EL GENOMA OCULTO • ENJAMBRES DE ROBOTS • ¿POR QUE DORMIMOS?

INVESTIGACION y CIENCIA

ENERO 2004
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL CONOCIMIENTO ETNOBOTANICO DE LOS TSIMANE'

EL ESPECTRO DEL RIEMANNIO

EL REMOLCADOR DE ASTEROIDES

LA TEORIA DE CUERDAS

RESONANCIA KONDO

EL VUELO CON ALAS FLEXIBLES

VECTORES VIRICOS ANTITUMORALES

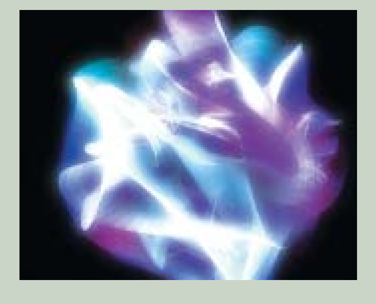
00328
9 770210 136004



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Enero de 2004

Número 328













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *El genoma oculto* y *Vectores víricos antitumorales*; Luis Bou: *El espectro del riemannio, Enjambres de robots* y *Aventuras problemáticas*; Juan P. Adrados: *El remolcador de asteroides*; Ramón Pascual: *Resonancia Kondo*; J. Vilardell: *Vuelo con alas flexibles, Hace..., Apuntes, Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; José Manuel García de la Mora: *¿Por qué dormimos?*



Portada: Cortesía de *NOVA*, con especial agradecimiento a Andrew J. Hanson de la Universidad de Indiana

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	**Dos años**
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

La Garganta de Olduvai. «Ese cañón del territorio de Tanganica, en Africa Oriental, ha producido la secuencia más completa de útiles humanos primitivos hasta ahora descubiertos, y con ellos una gran abundancia de restos de los ya extintos animales que cazó el hombre de la Edad de Piedra. En los superpuestos depósitos de la Garganta están escritos unos 400.000 años de la historia de la cultura humana: desde el Pleistoceno Medio hasta hace unos 15.000 años. Cubren casi todo el lapso de la etapa humana del hacha de mano, conocida por los arqueólogos como cultura Achelense. La Garganta de Olduvai, con su riqueza en vestigios de asentamientos humanos, parece un sitio ideal para buscar en él restos del mismo hombre del hacha de mano. Las condiciones para la fosilización de sus huesos fueron allí excelentes. —L. S. B. Leakey»

La “Lineal B” descifrada. «Una importante inscripción antigua que se había resistido a la traducción durante más de medio siglo acaba de ser descifrada. La escritura, conocida como ‘minoica lineal B’, era la usada en el imperio marítimo cretense que floreció hace más de 3500 años, mucho antes de los tiempos de Homero. El enigma lo ha resuelto Michael Ventris, arquitecto británico, que ha dedicado al problema sus ratos libres. El texto se descubrió en 1896, escrito sobre tablas de arcilla, en la ciudad de Knossos, en Creta.»

...cien años

Era del aeroplano. «El éxito del vuelo de un aeroplano propulsado por motor, el construido por los hermanos Orville y Wilbur Wright, es un acontecimiento de importancia suprema en la historia de la aeronáutica. Es una hazaña que marca el inicio de una época en la historia del aeroplano: ahora que ya se ha construido uno capaz de volar, la labor de recogida de datos experimentales proseguirá con una rapidez imposible cuando el vuelo de los aeroplanos, al menos a escala natural, aún no había rebasado la fase teórica.»

Pájaros y semillas. «No parece que en la migración de las aves estivales se encierren muchos datos para la deducción científica; pero el estudioso moderno de las aves de nuestra tierra descubre en esos vuelos anuales temas de reflexión y observación de la máxima importancia. Por ejemplo, el problema de la destrucción de las malas hierbas guarda íntima relación con las costumbres migratorias de los millones de aves de nuestras especies estivales. Muchas de nuestras malas hierbas, de jardín o campestres, producen en una sola estación hasta cien mil semillas. Sólo hay un medio eficaz para mantener a raya a tan prolíficos vegetales. Cuando al final del verano sus semillas maduran y caen, los millones de aves migratorias que inician su viaje hacia el sur las devoran. Hemos siempre supuesto que partían en cuanto se acercaba el frío del otoño. Pero no se trata de profetas meteorológicos, sino simplemente de unas pequeñas criaturas hambrientas que siguen los pasos de la maduración de las semillas.»

Precisión con rayos X. «El ortodiágrafo, recién presentado por Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft de Berlín, es un aparato Röntgen que facilita la obtención de una imagen verdadera de cualquier objeto en cualquier posición del plano de dibujo. La pantalla luminosa, que lleva incorporado el estilo con que se dibuja, está rígidamente conectada a la lámpara Röntgen mediante un armazón en U formado por piezas articuladas (*véase la fotografía*). Cuando hay que hacer un dibujo directamente sobre el cuerpo, se retira la cartulina del bastidor y en el estilo se sustituye el lápiz por un trazador dermatográfico.»

...ciento cincuenta años

Velas de parafina. «De ser ciertos los informes que recientemente nos han llegado del extranjero acerca de la fabricación de velas, nuestros balleneros no tardarán en atracar en puerto o en convertirse en *carboneros*. En una cantera a algo más de treinta kilómetros al este de Edimburgo (Escocia) hay un grueso yacimiento de esquisto oscuro. Hace unos años alguien pensó en destilar esquistos. Algunos son sumamente ricos en una sustancia inflamable, descomponible en gas y brea, que ha recibido el nombre de parafina. Con esa sustancia se hacen hermosas velas, en absoluto inferiores a las de cera. En Irlanda, introducen turba en enormes retortas, donde la destilan.»



Rayos X: Artefacto que localiza órganos internos, 1904

APUNTES

PALEONTOLOGIA

Los americanos de Siberia

Los arqueólogos han venido sosteniendo que los primeros americanos descendían de los grandes cazadores de mamuts que, al cruzar el puente de Bering de Siberia a Alaska en sus partidas, acabaron por colonizar el Nuevo Mundo. Las últimas dataciones con carbono sugieren que esa idea podría ser errónea. Se cree que los primeros americanos fueron los clovis, así llamados por el asentamiento próximo a Clovis, en Nuevo México, donde se descubrieron unas puntas de lanza acanaladas, características de aquel pueblo, de hace 13.600 años. La prueba de que los primeros pobladores de Clovis procedían de Asia se halló en el yacimiento ruso del lago Ushki, donde se atribuyó al carbón vegetal existente en una tumba una antigüedad de 16.800 años. Tras nuevos análisis, ahora han determinado unos investigadores norteamericanos y rusos que el carbón vegetal de Ushki tiene sólo 13.000 años: el grupo de allí y el de Clovis fueron contemporáneos. Para que los clovis tuvieran sus ancestros en el lago Ushki, deberían haber completado su emigración hacia el sur en menos de cuatro siglos.

—Charles Choi



Utensilios de los clovis, los primeros americanos

LINGÜISTICA

Jinetes o campesinos

Según una teoría, las lenguas indoeuropeas proceden de una protolengua diseminada hará unos seis mil años desde las estepas asiáticas por los jinetes nómadas kurgan. Según otra, derivan de las primeras comunidades agrícolas de Anatolia, de hará unos 9000 años: la protolengua indoeuropea habría acompañado a la expansión de la agricultura desde ese foco. Un análisis estadístico parece dar la razón a esta última hipótesis. Se trata de una variante de la glotocronología, procedimiento que traslada a las lenguas lo que se hace para los genomas. Se toma un repertorio de cientos de palabras básicas de un conjunto de idiomas y, bajo la premisa de que las sustituciones léxicas se producen a un ritmo constante, no sólo se establecen relaciones filogenéticas entre las lenguas, sino que se datan también con fechas absolutas los momentos en que divergieron. Los intercambios lingüísticos y el poco fundamento de la premisa no permiten tener mucha fe en los análisis glotocronológicos. Pero la variante de dos investigadores neozelandeses elude esos problemas. Hará unos 8700, según sus resultados, se produjo la primera ramificación, que separó al hitita de las demás lenguas indoeuropeas. Menos de mil años después, apareció la rama de las lenguas tocarias. Hará unos 7300, una nueva rama daría lugar a las familias griega y armenia; las demás lenguas asiáticas se separarían de las otras europeas unos 400 años después. Hace 5500 años se produjo la división entre las que acabarían siendo las lenguas germánicas y las futuras romances. (Se les habían desprendido antes las predecesoras del irlandés y del galés, y hará 6500 años las lenguas eslavas.) Ya en la Edad Media, una primera ramificación de las lenguas romances separó el sardo; enseguida, el italiano se diferenciaría de las demás, y en rápida sucesión harían lo propio el rumano y, por fin, las lenguas de Francia y las ibéricas. El albanés pertenecería a la radiación asiática; apareció hace sólo unos seiscientos años.

DETECTORES

Tubos colectores

Los detectores existentes de contaminantes y agentes químicos y biológicos sólo reaccionan ante densidades hasta cierto punto altas de esas sustancias. Los dispositivos vibratorios pueden concentrar aerosoles en nodos de baja presión, pero cuesta mucho alinear los modelos actuales, que consumen además mucha energía. Ahora, un tubo de cristal piezoeléctrico concentra las partículas hasta 40 veces, con unos insignificantes 0,1 watt; resulta por eso adecuado para detectores portátiles alimentados por pilas, según unos investigadores del Laboratorio Nacional de Los Alamos. Allí se hicieron vibrar unos tubos de varios centímetros de ancho y largo, de manera que oscilase su diámetro y se generase una onda de presión estacionaria que atrapara las partículas. El tubo produjo tres estrechas venas paralelas al eje, con unas corrientes de aire de hasta 250 litros por minuto.

—J. R. Minkel



Las vibraciones atrapan los aerosoles a lo largo de tres nodos (puntos blancos)

PETER BOSTROM (*arriba*); CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL DE LOS ALAMOS (*abajo*)

BOTANICA

No se acerque

El naranja radiante de las alas de las mariposas monarca alerta a los depredadores hambrientos de que esos insectos son veneno. De modo parecido, los deslumbrantes despliegues de naranjas, rojos y amarillos de los bosques en otoño podrían también advertir a comensales en ciernes acerca de las defensas químicas de los árboles. Snorre Hagen y su equipo, de la Universidad de Trömso (Noruega), observaron durante un par de años las hojas y las flores de una docena de abedules de montaña. Se creía que los brillantes colores del follaje otoñal no eran sino una consecuencia del envejecimiento de las hojas al cesar en ellas la fotosíntesis, pero según Hagen y sus colegas, cuanto antes, y en mayor número, cambien los árboles de color, tanto menores serán los daños debidos a los artrópodos en la estación siguiente. Para descubrir los mecanismos que reducen tales agresiones se requieren además análisis de la química de las hojas y pruebas con herbívoros sensibles a los colores.

—*Charles Choi*



Los colores otoñales podrían ser una señal de aviso para los insectos

PSIQUIATRIA

Depresivos

Según un metaanálisis (una investigación estadística que no se basa en nuevos muestreos, sino en el estudio de los ya efectuados) publicado en 1998 con el sugerente título de "Se escucha al Prozac, pero se oye el placebo", los fármacos antidepresivos no curan más que un terrón de azúcar. Pero los metaanálisis no convencen a todo el mundo. Así, Kupfer y Nemeroff (catedráticos de psiquiatría y asesores de fabricantes de esos productos) informaban al duodécimo Congreso Mundial de Psiquiatría, celebrado a finales de 2002, de las virtudes de nuevos antidepresivos, como el recién aprobado escitalopram, un inhibidor selectivo del receptor de la serotonina (SSRI), que lograba la remisión de la depresión de un 40 % de los pacientes, frente a un 30 % de "éxitos" del placebo. Si esto debe entenderse como una nítida diferencia entre la medicina real y la "fantasiosa", quede a la consideración de cada uno. Por ejemplo, de la Agencia Reguladora de Fármacos y Productos para la Salud (MHRA) del Reino Unido. El doctor David Healy, que receta antidepresivos y fue consultor de empresas farmacéuticas, perdió una plaza que tenía concedida en la Universidad de Toronto tras una disertación en la que aludió a los riesgos de los SSRI. Healy ha insistido en denunciar la "autoría fantasma": un profesor presta su firma a un informe elaborado por los laboratorios farmacéuticos. Ha emprendido, además, campaña contra la ocultación por los fabricantes del resultado de estudios, efectuados por ellos mismos, en los que se observaba un número anómalo de suicidios entre pacientes tratados con algunos SSRI y antipsicóticos —el Lustral de Pfizer o Zyprexa de Ely Lilly—. La MHRA parece darle la razón a Healy. Acaba de ordenar que no se receten SSRI a menores de 18 años, con la excepción del Prozac. (Antes había prohibido ese uso particular de la paroxetina y la venlafaxina). Pero de los beneficios terapéuticos del Prozac (fluoxetina) a corto plazo advierte que no pasan de "modestos".

FISICA

Resbalar y deslizar

Al parecer, es posible la existencia de un rozamiento negativo, en virtud del cual las moléculas ganasen velocidad y no al revés. Tras el fenómeno se hallaría la fuerza de van der Waals, que de ordinario produce una débil atracción mutua entre las moléculas. Los electrones vibran; al acercarse mucho oscilan sincronizados, generándose así una atracción eléctrica. El rozamiento negativo nacería de la modificación de esa vibración; para conseguirlo se aprovecharía la variación de la frecuencia por efecto Doppler; en virtud de la misma, cada molécula ve a los electrones de sus vecinas como si vibraran a cierta frecuencia mientras se acercan y como si vibraran a una frecuencia algo menor según se alejan. Adam E. Cohen y Shaul Mukamel afirman que resulta posible alterar el modo en que vibran los electrones (mediante luz o calor, por ejemplo) y sintonizar las frecuencias de manera que las moléculas se atraigan al acercarse y se repelan al separarse.

—*Charles Choi*



Quizá se puedan modificar las interacciones moleculares de forma que la fricción ejerza un efecto de impulso, no de retardo

JOHNNY JOHNSON (*arriba*); DiMAGGIO/KALISH *Corbis* (*abajo*)



TGGGATAGCGACGAGCCAGTCTGCTCTAGACAGACGTAGCATATGGGATAGCGACAGACAGACGTAGCATATGG

El genoma oculto

Cuando se daban por conocidos casi todos los datos del ADN, han aparecido dos capas amplias de información en los cromosomas, en buena parte ocultas, que afectan a la herencia, el desarrollo y la enfermedad

W. Wayt Gibbs

Hace unos veinte años, los astrónomos estaban convencidos de que la rotación de las galaxias no se podía explicar sólo a partir de las leyes de la gravedad y la posición de los cuerpos celestes. Poco a poco empezaron a admitir que el universo no estaba tan vacío como parecía, sino que debía contener algún tipo de materia obscura. Aunque se desconocían su composición química y su funcionamiento, no faltaban indicios de su existencia. La investigación de la materia oscura y, más recientemente, la energía oscura obligó a revisar teorías admitidas; incluso a sustituirlas. Al propio tiempo, sin embargo, se dio un nuevo impulso a la astrofísica y la cosmología.

Un fenómeno parecido comienza ahora a producirse en la genética molecular. En 2003 se celebró el quincuagésimo aniversario del descubrimiento de la doble hélice; el Proyecto Genoma Humano anunció también la terminación del borrador de la secuencia del ADN de *Homo sapiens*. Se había logrado domeñar el ADN *in vitro*. Eso se creía. Sin embargo, cuando se compara el genoma de especies sin parentesco próximo y se escudriña el funcionamiento de los cromosomas *in vivo*, se observan fenómenos inexplicables en el marco de las teorías vigentes.

Las revistas y los congresos científicos han empezado a hacerse eco de nuevos datos que contradicen la idea aceptada de que los genes, segmentos de ADN que codifican proteínas, constituyen la única fuente de herencia y encierran los planos de la vida. Del mismo modo en que la materia oscura influye sobre el destino de las galaxias, el genoma oculto ejerce un control del desarrollo y de los rasgos distintivos de los organismos, desde las bacterias hasta el hombre. El genoma contiene mucho más que genes codificadores de proteínas.

1. LOS LUNARES DE COLOR MARRON OSCURO del iris podrían deberse a la acción del genoma oculto. Hay rasgos que no se transmiten mediante los genes, sino a través de modificaciones químicas de los cromosomas, cambios que se regulan en parte por fragmentos del ADN redundante. A diferencia de las mutaciones genéticas, estos rasgos heredables son a menudo reversibles; aparecen en unas células y no en otras. (La esfera blanca en el iris no es más que el reflejo de la luz que ilumina el ojo.)

JAMIE KRIPKE

TGGGATAGCGACGAGCCAGTCTGCTCTAGACAGACGTAGCATATGGGATAGCGACGAGCCAGTCTGCTCTAGAC

Nos hallamos muy lejos de conocer el alcance de ese genoma oculto. Sí sabemos que existen al menos dos capas de información, amén de los genes tradicionales. Una de ellas está entrelazada con el ADN intergénico, las vastas secuencias no codificadoras que interrumpen y separan los genes. Desechadas durante largo tiempo por irrelevantes para la síntesis de proteínas, lo cierto es que muchas de estas secciones se han conservado, en su mayor parte intactas, en el transcurso de millones de años de evolución. Cabe, pues, suponer que desempeñarán algún papel indispensable para el organismo. De hecho, un elevado número de las mismas se transcriben en variedades de ARN que realizan funciones muy diversas. Hay incluso quienes sospechan que las diferencias entre individuos de la misma especie, o incluso entre especies, se originan en las variaciones de ese ADN redundante, o "chatarra" por usar el vulgarismo al uso.

Más allá de la secuencia de ADN, existe en los cromosomas otra capa de información harto más maleable. Las marcas epigenéticas, incrustadas en una mezcolanza de proteínas y metabolitos, rodean, apoyan y se unen al ADN. Operan a través de códigos crípticos y mecanismos desconocidos. A diferencia de los genes, las señales epigenéticas se asientan, se borran y se reescriben en instantes. Por tanto, mientras que las mutaciones genéticas persisten durante toda una vida, los errores epigenéticos, implicados en una lista creciente de patologías, pueden revertir mediante fármacos. Se están ensayando ya ciertos tratamientos basados en esta estrategia para pacientes de leucemia.

Como afirma Carmen Sapienza, de la Universidad de Temple, aumenta el convencimiento de que lo que puede ocurrir en el genoma, termina por suceder. Sapienza comenzó a investigar los fenómenos epigenéticos cuando nadie les prestaba particular atención, por considerárseles anomalías menores.

Resumen/*Genes ocultos*

- Desde hace tiempo, los genéticos han centrado su atención en la escueta región del ADN que contiene las instrucciones para la síntesis de proteínas. El ADN restante que, en el caso de los humanos, alcanza el 98 por ciento del total, se descartaba por redundantes. Pero el descubrimiento de muchos genes ocultos que operan a través del ARN, y no de las proteínas, ha puesto en cuestión ese punto de vista.
- Tales genes de sólo ARN, cortos y difíciles de identificar, desempeñan, en algunos casos, funciones importantes en la salud y el desarrollo de los organismos.
- Intervienen también formas activas de ARN en la regulación de una capa epigenética de información heredable que reside en los cromosomas, aunque fuera de la secuencia de ADN.

Los peligros del dogmatismo

Llevará años, quizá décadas, construir una teoría que explique fundadamente la interacción entre ADN, ARN y señales epigenéticas en un sistema autoregulador. Pero resulta claramente necesario encontrar un nuevo modelo teórico que sustituya al dogma central de la biología, en el que se ha basado, desde los años cincuenta, la genética molecular y la biotecnología. A tenor del mismo, el ADN se transcribe en ARN y éste se traduce en proteínas, encargadas de la mayoría de las funciones biológicas. La información genética se almacena en las hebras arrolladas de ADN, concretamente en las bases químicas adenina (A), timina (T), guanina (G) y citosina (C), que se emparejan para formar los peldaños de la escalera de ADN (C con G y A con T). Un gen está constituido por una secuencia determinada de bases, de uno de los lados de la escalera, que especifica una proteína.

La síntesis de proteínas, expresión de los genes, discurre en cuatro pasos. Primero, una enzima se une al cromosoma y se desliza a lo largo del gen, transcribiendo la secuencia de una hebra del ADN en una hebra sencilla de ARN. A continuación, los intrones, segmentos del ARN transcrito inicial no codificadores, se eliminan; los fragmentos restantes se empalman para formar ARN mensajero. El ARN mensajero sale entonces del núcleo y pasa al citoplasma, se encuentra con los ribosomas, que lo traducen en una cadena de aminoácidos. Por fin, cada cadena se pliega en función de las interacciones entre sus aminoácidos, formando una estructura tridimensional intrincada, característica de cada proteína.

Esta estructura tridimensional les confiere una gran versatilidad. Unas proteínas forman músculos y órganos; otras constituyen enzimas, que catalizan, metabolizan o señalan. Las hay también que regulan genes al unirse a secciones específicas del ADN o del ARN. No es sorprendente, por tanto, que el dogma central de la genética molecular considere, con escasas excepciones, que una secuencia de ADN constituye un gen sólo si se traduce en una proteína.

Cuando se dice que el genoma humano consta de unos 27.000 genes, se alude, por lo común, a los genes que codifican proteínas. Se trata de una cifra provisional, pues las estimaciones oscilan entre 20.000 y 40.000. Con todo, confirma que no existe una correspondencia clara entre la complejidad de una especie y su número de genes. La mosca del vinagre tiene menos genes codificadores que un nemátodo; el arroz tiene más que el hombre. En cambio, la cantidad de ADN no codificador sí parece acompasar a la complejidad del organismo. Participa de esta idea John S. Mattick, de la Universidad de Queensland en Brisbane.

En los organismos superiores, hombre incluido, los genes se dividen en exones, fragmentos codificadores de proteínas, e intrones, extensos fragmentos que no codifican. En los cromosomas humanos, los exones representan menos del 2 por ciento del ADN. Por tanto, los 3000 millones de pares de bases que porta cada célula de nuestro cuerpo deben cumplir alguna otra



2. GRANDES DIFERENCIAS en el aspecto y la salud de los organismos pueden deberse a pequeños cambios en los genes. Las plantas *Arabidopsis*, por ejemplo, tienen hojas en forma de cuchara (*izquierda*), pero cuando, por manipulación genética, se interfiere en la acción de un microRNA producido por un gen de sólo ARN, las *Arabidopsis* mutantes desarrollaron defectos toscos (*derecha*). El microARN controla los niveles de actividad de numerosos genes.

misión. Sin embargo, los intrones y las largas secuencias de ADN intergénico se han considerado siempre material redundante, "chatarra" evolutiva.

Tal visión comienza a tambalearse. Se está descubriendo un número ingente de "genes" con un cometido claramente funcional, aun cuando no determinen ninguna proteína y produzcan sólo ARN. El término "gen" ha recibido siempre una definición bastante borrosa. Estos genes que sólo producen ARN añaden obscuridad a su significado. Para evitar confusiones, se tiende, de un tiempo a esta parte, a evitar el vocablo gen; para referirse a cualquier segmento que se transcriba en ARN algunos prefieren la expresión "unidad de transcripción".

Durante el Congreso Internacional de Genética que tuvo lugar en julio de 2003 en Melbourne, Claes Wahlestedt, del Instituto Karolinska de Estocolmo, hizo públicos sus resultados; de acuerdo con sus estimaciones, fundadas en el estudio exhaustivo del genoma del ratón, habría entre 70.000 y 100.000 unidades de transcripción, la mitad de las cuales sin función codificadora. Si anda en lo cierto, por cada secuencia de ADN que determina una proteína, habría otra que opere exclusivamente a través de formas activas de ARN; formas que no constituyen meros anteproyectos de proteínas, sino que alteran de forma directa el comportamiento celular.

Lo que se predica del ratón podrá, a buen seguro, aplicarse al hombre y a otros organismos. En el Instituto Nacional estadounidense de Investigaciones sobre el Genoma Humano se han comparado extractos de genomas del hombre, vaca, perro, cerdo, rata y siete especies más. Mediante análisis por computador se han identificado 1194 segmentos que presentan, en diversas especies, variaciones sólo menores. De lo que se infiere que se trata de secuencias que contribuyen a la adaptación evolutiva de las especies. Lo más sorprendente es que sólo 244 de estos segmentos se encuentran en el interior de una secuencia nucleica codificadora de proteínas. Alrededor de dos tercios de las secuencias conservadas residen en intrones; el resto se encuentra disperso entre el ADN intergénico.

No sería de extrañar que el concepto de ADN "chatarra" se convierta en un ejemplo clásico de cómo la doctrina admitida puede desvirtuar la interpretación de las observaciones. Haber ignorado la posibilidad de que estas secuencias no codificadoras transmitieran información paralela en moléculas de ARN ha constituido uno de los grandes errores sufridos por la biología molecular.

Más que un mensajero

Con la nueva perspectiva, comienzan a descubrirse en el ARN una amplia gama de misiones celulares. Igual que las proteínas, algunos transcritos de ARN interaccionan con otros fragmentos de ARN, con ADN, con proteínas e incluso con moléculas pequeñas. Ahora bien, si las proteínas operan de un modo analógico, el ARN lo hace, siguiendo la metáfora, de un modo digital. Las proteínas se unen a sus moléculas diana por semejanza estructural, es decir, como la llave a su cerradura. El ARN, en cambio, se caracteriza por una secuencia específica, como los códigos postales. Así, un fragmento de ARN puede moverse sin rumbo hasta tropezar con un ADN (u otro ARN) que tenga una secuencia complementaria. Los dos brazos de la escalera unen entonces sus peldaños: las bases C emparejadas con las bases G, las T o U con las A.

Los pseudogenes, copias defectuosas de genes funcionales, ofrecen un buen ejemplo de la potencia infravalorada del ARN. La investigación del ADN humano ha puesto de manifiesto la existencia de un número

similar de genes y de pseudogenes. Durante decenios, los pseudogenes se habían considerado fósiles moleculares, restos de genes degradados por mutaciones y desechados en el curso de la evolución. Pero hace poco, el equipo dirigido por Shinji Hirotsune, de la Universidad de Saitama, publicó el descubrimiento del primer pseudogén funcional.

Hirotsune buscaba obtener ratones transgénicos que portaran el gen *sex-lethal* (*Sxl*) de la mosca del vinagre. La mayoría de los ratones respondieron bien a la presencia de ese gen foráneo, que controla la determinación sexual y la expresión de los genes ligados al sexo. Pero en una cepa, el intruso hizo gala de su nombre: todos los ratones de la misma murieron antes de la madurez. El gen *Sxl* se había insertado en medio de un pseudogén y lo había alterado. Este pseudogén, *makorin1-p1*, es una copia jibarizada de *makorin1*, un gen antiguo que los ratones comparten con la mosca del vinagre, nemátodos y otras muchas especies. Aunque se ignora la función de *makorin1*, sí se sabe que los ratones poseen grandes cantidades de pseudogenes de *makorin1* y que ninguno de ellos determina proteínas. Si estos pseudogenes no codifican, cabe preguntarse por qué mueren los ratones que pierden uno de ellos.

Por alguna razón, se desactiva *makorin1* —y por lo que parece sólo él— cuando se bloquea *makorin1-p1*. Con otras palabras, el ARN constituido a partir del pseudogén controla la expresión del gen “real”, cuya secuencia remeda, aun cuando los dos residan en cromosomas diferentes. Por tanto, ‘pseudo’ no es el prefijo que mejor describe la actividad de *makorin1-p1*.

Resulta todavía prematuro avanzar que muchos pseudogenes originan un ARN activo. Pero existe una plétora de otras fuentes dispersas por las regiones obscuras del genoma. A cada gen codificador de una proteína le corresponde una secuencia de ADN complementaria que se asienta en el otro brazo de la escalera y que habitualmente no se transcribe en ARN. Se la denomina a veces copia de seguridad, porque la célula recurre a ella para reparar una lesión del gen.

En algunos casos, sin embargo, esta cadena complementaria actúa por su cuenta: mientras el gen se está transcribiendo en ARN mensajero, su *alter ego* produce un ARN antisentido, dotado de una secuencia complementaria. Cuando un ARN normal se encuentre con su correspondiente ARN antisentido, las dos hebras se unirán para formar una doble hebra que impide la síntesis génica de la proteína.

Se sabía que bacterias y plantas podían fabricar ARN antisentido. Muchos pensaron que, de darse en los mamíferos, constituiría una rareza. Pero en abril de 2003, Galit Rotman y su grupo de la empresa CompuGen, de Tel Aviv, acabaron con tal singularidad. Tras una exhaustiva inspección de las bases de datos del genoma humano, llegaron a la conclusión de que al menos 1600 genes humanos (probablemente muchos más) tenían una cadena complementaria que producía ARN antisentido.

Estos ARN en liza podrían suprimir un gen a través del bloqueo de su ARN mensajero. Rotman, sin embargo, sospecha que se sirven del mecanismo de interferencia del ARN (iARN), un sistema de seguridad que las células animales y vegetales utilizan para silenciar genes. Cuando en una célula aparece ARN de doble hebra, las enzimas lo trocean en fragmentos que reciben el nombre de ARN de interferencia pequeños (ARNip). Las dos hebras de ARNip se desenrollan entonces y una de las cadenas se encarga de encontrar e incapacitar cualquier molécula de ARN mensajero que se una a su secuencia. Este sistema censor protege las células contra los virus, que a menudo vacían su carga en forma de ARN de doble hebra. Además, constituye una herramienta muy útil para los investigadores ya que les permite silenciar a voluntad cualquier gen [*véase* “Interferencia de ARN”, por Nelson C. Lau y David P. Bartel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2003].

Sin embargo, ni los pseudogenes ni los ARN antisentido pueden explicar el perfil foliar de *Arabidopsis*, una mala hierba de la familia de la mostaza. Sus hojas recuerdan la forma de una cuchara. Según un ar-

Progresión de la genética

DESDE QUE LA INVENCION de la técnica del ADN recombinante posibilitó el desarrollo de la ingeniería genética, la investigación opera “hacia atrás”. Se escoge un gen de interés, se le estudia en un cultivo celular o en un organismo, se observan los cambios provocados con su presencia y, por fin, se deduce la función del gen. Se trata de un enfoque reduccionista, clásico y potente.

Pero a medida que la fracción oculta del genoma (las secuencias funcionales del ADN que se suponían redundantes) gana protagonismo, se pone sobre el tapete un problema desconocido, a saber, que esa genética retrógrada desemboca en un túnel. De ahí el interés creciente por un nuevo enfoque de sentido contrario: progresivo. Se trata de identificar los genes, clásicos o no, con unas técnicas que miran hacia adelante.

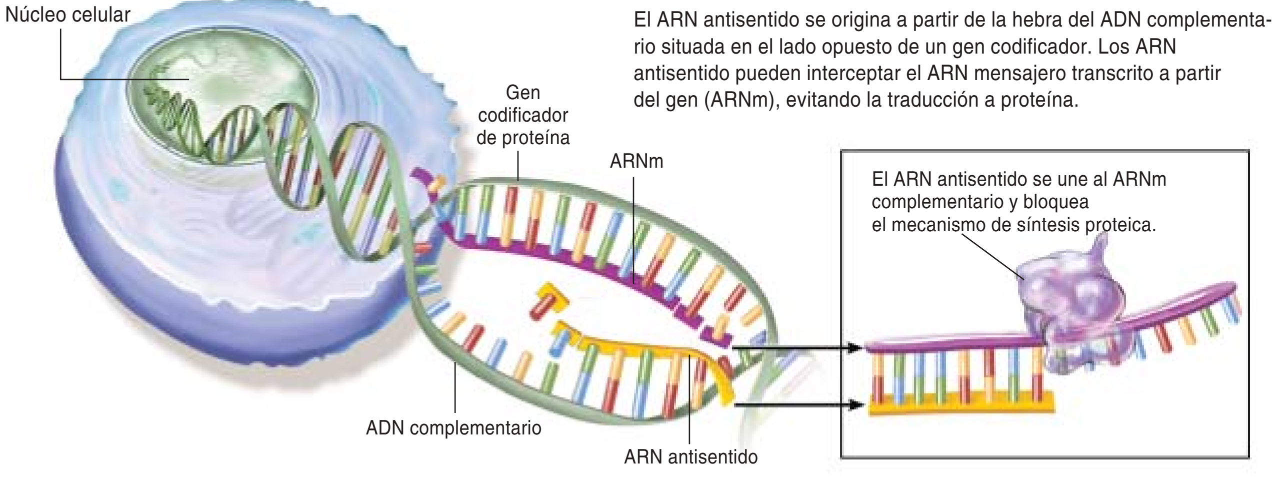
En este contexto, la compañía Phenomix, de La Jolla, ha puesto en funcionamiento una línea de producción de ratones mutantes. En cada grupo de ratones, las mutaciones aleatorias de su genoma desactivan no sólo genes que codifican proteínas, sino también otros genes ocultos que sólo producen formas activas de ARN.

Photomix ha comenzado a la vez con ratones sanos y con otros con patologías análogas a las humanas diabetes, asma, artritis o enfermedad de Parkinson. Algunas mutaciones inducen o alivian los síntomas de estas alteraciones en el ratón. Se realiza entonces un barrido genético para determinar las mutaciones responsables de tales efectos. Está todavía por ver si este nuevo enfoque inspirará un diseño de fármacos más eficaz. De momento, esa genética progresiva ha sacado ya a la luz fenómenos genéticos insospechados: los pseudogenes funcionales, por ejemplo.

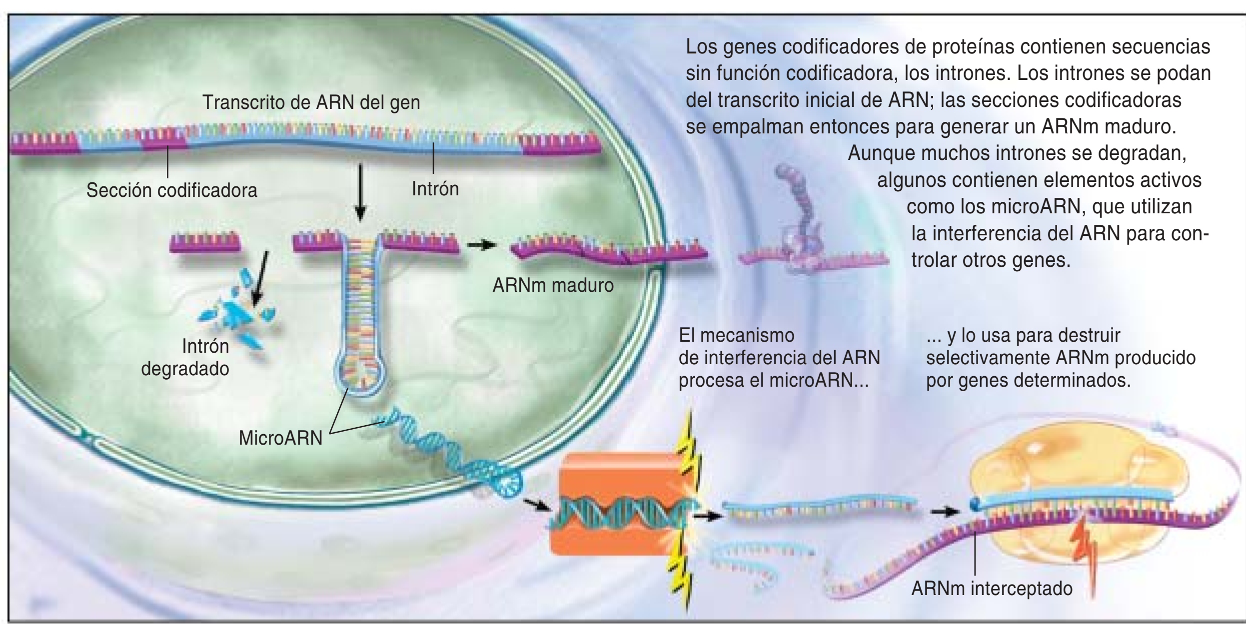
GENES SINGULARES

LOS GENES, de acuerdo con la doctrina admitida, constituyen segmentos de ADN que codifican proteínas funcionales. Sin embargo, esas secuencias integran sólo un 2 por ciento del genoma humano. El resto corresponde a ADN que no se dedica a ese menester, pero que dista de resultar superfluo. Están apareciendo muchos genes no codificadores que originan formas de ARN sorprendentemente activas; entre ellas, las silenciadoras o reguladoras de genes codificadores.

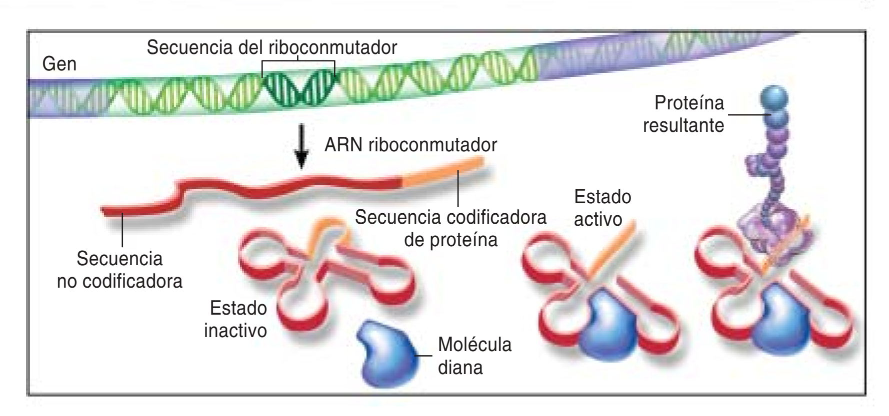
El ARN antisentido se origina a partir de la hebra del ADN complementario situada en el lado opuesto de un gen codificador. Los ARN antisentido pueden interceptar el ARN mensajero transcrito a partir del gen (ARNm), evitando la traducción a proteína.



Los genes codificadores de proteínas contienen secuencias sin función codificadora, los intrones. Los intrones se podan del transcrito inicial de ARN; las secciones codificadoras se empalman entonces para generar un ARNm maduro. Aunque muchos intrones se degradan, algunos contienen elementos activos como los microARN, que utilizan la interferencia del ARN para controlar otros genes.



Los riboconmutadores, una forma de ARN recientemente descubierta, actúan como conmutadores genéticos de precisión. Producidos en muchos casos a partir de ADN intergénico, se pliegan en estructura compleja. Una parte del ARN plegado se une a una molécula diana. Otra parte contiene el código para sintetizar una proteína. El riboconmutador se activa y produce la proteína sólo en presencia de su molécula diana.



TERESE WINSLOW



3. IDENTICOS EN TODO, MENOS EN EL NOMBRE, estos ratones de una misma camada y pertenecientes a una cepa endogámica comparten el ADN prácticamente en su totalidad. Sin embargo, su color varía del amarillo dorado al caoba. Ello se debe a las variaciones en las marcas epigenéticas del ADN intergénico. El color del pelo de estos ratones no puede deducirse de las teorías genéticas actuales.



tículo que Detlef Weigel y su equipo, del Instituto Max Planck de Biología del Desarrollo en Tubinga, publicaron en *Nature* en agosto de 2003, la planta debe sus elegantes curvas simétricas, en parte, a un microARN.

Descubiertos hace unos años en los nemátodos, los microARN son cadenas cortas de ARN no codificador que se doblan sobre sí mismas, a la manera de horquillas. En *Arabidopsis*, la maquinaria de la interferencia de ARN captura el microARN producido por el gen *JAW* como si se tratara de un virus. Pero la secuencia de *JAW* se empareja con un grupo de genes que producen proteínas, miembros de una familia que controla la forma y el tamaño de la planta. El censor celular desactiva cada uno de ellos recortando casi por completo el ARN mensajero que transcriben. Así, el *JAW*, un gen diminuto que sólo produce ARN, sirve de palanca para que las células de *Arabidopsis* ajusten el "volumen" de un conjunto de genes codificadores de proteína cruciales. Cuando Weigel y los suyos crearon plantas transgénicas en las que los microARN no podían realizar su función, los nuevos vegetales enfermaron y se deformaron.

En pocos años, se han encontrado centenares de microARN; sólo en el hombre, más de 150. Parecen constituir una buena herramienta de control genético para los organismos. Alrededor de la mitad de los microARN del hombre también aparecen, en forma casi idéntica, en el ADN de un pez de la familia *Tetraodontidae*, aun cuando las dos especies tomaron distintos caminos evolutivos hace 400 millones de años.

Sigue sin comprenderse qué hacen en el hombre esos 150 microARN. Anna M. Krichevsky, de la facultad de medicina de Harvard, sospecha que podrían desempeñar un papel importante en el desarrollo del cerebro, por lo menos. En su laboratorio se han valido de un chip de genes para identificar, en neuronas de ratón, hasta 44 clases diferentes de microARN. En septiembre de 2003, Krichevsky señaló que los niveles de nueve microARN se regulaban con suma precisión a medida que se desarrollaba el cerebro del múrido. Para Diya Banerjee, de la Universidad de Yale, nos encontramos en la antesala de una explosión de conocimientos en el nuevo dominio que se ha abierto.

Analógico y digital

Si se nos permite la imagen, las proteínas vendrían a ser los percherones de la célula, en tanto que el ARN activo porta a veces la fusta. El ARN se desenvuelve con la eficacia de una proteína en operaciones de catálisis, señalización y activación. Para sorpresa de no pocos, interviene incluso en determinadas enfermedades hereditarias.

Los genéticos clínicos se esforzaron a lo largo de más de nueve años en descubrir el gen de la hipoplasia de cartílago y cabello. Esta enfermedad recesiva se identificó entre los amish: uno de cada 19 lleva una copia del gen defectuoso, causante de un enanismo poco habitual. Los que sufren esta enfermedad no sólo tienen una baja estatura, sino que además corren un riesgo elevado de padecer cáncer y trastornos inmunitarios. Maaret Ridanpää, de la Universidad de Helsinki, siguió la pista de este gen hasta el cromosoma nueve, secuenció una región extensa del mismo y estudió, uno por uno, los diez genes codificadores de proteínas situados en aquella zona. Ninguno de ellos causaba la enfermedad.

Por fin, en 2001, Ridanpää y sus colaboradores identificaron el responsable: un gen que sólo produce ARN, el *RMPP*. El ARN transcrito a partir del *RMPP* se une con proteínas para formar una enzima que actúa en el interior de las mitocondrias, orgánulos generadores de energía de la célula. Basta un cambio en una sola base de este ARN para imponer la diferencia que separa una talla y salud normales de una estatura y vida cortas, si la misma mutación se hereda de ambos padres. Recientemente, se ha descubierto que estos ARN "analógicos", que se repliegan, lo mismo que las proteínas, en formas complejas, resultan esenciales para el funcionamiento de enzimas que protegen los cromosomas y escoltan señales proteicas segregadas hacia el exterior de la membrana celular.

Tal vez la forma más curiosa de este ARN descubierta hasta la fecha la constituya el riboconmutador. Fue aislado en 2003 por Ronald R. Breaker, de la Universidad de Yale. Lo mismo que otros muchos, también el equipo de Breaker se cuestionaba cómo pudieron sobrevivir, hace miles de millones de años, los primeros precursores químicos en un mundo de ARN, es decir, antes de que existieran el ADN y las pro-

teínas. El grupo de Yale imaginaba que tales protoorganismos necesitarían los ARN para llevar a cabo misiones de sensores y conmutadores que les facultaran responder a cambios en el entorno y en su metabolismo. Para someter a prueba esta hipótesis, se aprestaron a producir moléculas de ARN con dichas capacidades.

Crearon varios conmutadores sintéticos de ARN, largas moléculas de ARN que poseen al mismo tiempo un extremo codificador y otro no codificador. Cuando el ARN se pliega, el extremo codificador se vuelve sensible a una determinada molécula. El encuentro con esta diana provoca la activación del conmutador; ello comporta que el otro extremo, portador de las instrucciones para la síntesis de proteína, cambie de forma. Por consiguiente, el riboconmutador promueve la síntesis proteica, cual si se tratara de un gen normal, pero sólo tras alcanzar su molécula diana.

En su búsqueda de riboconmutadores, el grupo de Breaker no tardó en hallarlos escondidos en el ADN intergénico. Estos conmutadores genéticos de precisión se han extraído de especies pertenecientes a toda la escala orgánica. Probablemente, pues, estaban ya en el último antepasado común, en los albores de la evolución.

En agosto de 2003, publicaron un estudio sobre una familia de riboconmutadores que regula la expresión de no menos de 26 genes de *Bacillus subtilis*; todos de suma importancia, al tratarse de genes que el microorganismo necesita para metabolizar el azufre y aminoácidos. Breaker calcula que *B. subtilis* posee al menos 68 genes, casi el 2 por ciento del conjunto total, bajo el control de riboconmutadores. En su laboratorio han comenzado ya a sintetizar moléculas híbridas analógico-digitales, aptas para la destrucción selectiva de gérmenes.

La visión global

A medida que se identifican nuevos genes de ARN activo en los intrones y el ADN intergénico, tanto tiempo olvidados, se desvanece la imagen de poseer un listado completo para el hombre o cualquier otra especie superior. A diferencia de los genes productores de proteínas, cuya secuencia está limitada por señales de 'inicio' y 'fin', los genes de sólo ARN varían tanto, que los programas informáticos no consiguen detectarlos en las secuencias de ADN.

Para estimular la técnica, el Instituto estadounidense de Investigaciones del Genoma Humano ha invertido 36 millones de dólares en un ambicioso proyecto: la "Enciclopedia de Elementos de ADN". En tres años, se pretende catalogar todo tipo de proteínas y ARN sintetizados a partir de un escogido uno por ciento del genoma humano.

Nadie sabe todavía qué panorama genético se nos abrirá una vez salga a la luz esa capa de información ahora oculta. El ADN redundante que antaño se desechó por ignorarse su función, podría quizá convertirse en el fundamento de la complejidad humana. Así lo avalan pseudogenes, ARN antisentido, microARN y riboconmutadores. El ARN activo, como se empieza a saber ahora, contribuye a controlar la estructura general de los cromosomas y algunas de sus modificaciones químicas cruciales; dicho de otro modo, constituye una nueva capa de información epigenética.

Bibliografía complementaria

NON-CODING RNA GENES AND THE MODERN RNA WORLD. Sean R. Eddy en *Nature Reviews Genetics*, vol. 2, págs. 919-929; diciembre de 2001.

AN EXPANDING UNIVERSE OF NON-CODING RNAS. Gisela Stortz en *Science*, vol. 296, págs. 1260-1263; 17 de mayo de 2002.

WIDESPREAD OCCURRENCE OF ANTISENSE TRANSCRIPTION IN THE HUMAN GENOME. Rodrigo Yelin et al. en *Nature Biotechnology*, vol. 21, págs. 379-385, abril del 2003.

CHALLENGING THE DOGMA: THE HIDDEN LAYER OF NON-PROTEIN-CODING RNAS IN COMPLEX ORGANISMS. John S. Mattick en *BioEssays*, vol. 25, págs. 930-939, octubre de 2003.

El espectro del riemannio

La función zeta de Riemann, los números primos, los núcleos atómicos pesados: nociones matemáticas que parecen muy abstractas y fenómenos físicos muy concretos exhiben unas mismas correlaciones estadísticas

Brian Hayes

En 1972 se conocen Hugh Montgomery, joven experto en teoría de números, y Freeman Dyson, físico, en Fuld Hall, uno de los edificios del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Montgomery le cuenta a Dyson que las correlaciones entre pares de puntos de los ceros de la función zeta de Riemann obedecen a

$$1 - \left(\frac{\operatorname{sen}(\pi x)}{\pi x}\right)^2$$

Dyson se maravilla. ¿Se ha dado cuenta —le pregunta a Montgomery— de que se trata de la función de correlación entre pares de autovalores de una matriz hermítica aleatoria? ¿Y de que es el modelo de los niveles de energía de un núcleo pesado, de, digamos, el U-238?

El encuentro casual de Montgomery y Dyson reveló una conexión insospechada entre áreas, en apariencia muy alejadas, de la física y las matemáticas. ¿Por qué habría de describir una misma ecuación tanto la estructura de un núcleo atómico como la de una sucesión que pertenece al meollo mismo de la teoría de números? ¿Y qué tienen que ver las matrices aleatorias con uno u otro de estos dominios? En años recientes, han hecho aparición en lugares insospechados: en los solitarios con cartas, los gases unidimensionales o los sistemas cuánticos caóticos. ¿Se trata de una mera coincidencia o se nos esconde algo entre bastidores?

El espectro del intercolumnio

Una cuestión que se plantea en todas las ciencias es la distribución —sea en el espacio, en el tiempo o en alguna otra dimensión más abstracta— de los entes que estudian. En astronomía se desea conocer de qué modo están diseminadas las galaxias por el universo; en biología podría interesar la distribución de los genes a lo largo de un filamento de cromatina; en sismología, la pauta de los terremotos en el tiempo; un matemático cavilará sobre la dispersión de los números primos entre los enteros. En este artículo consideraré solamente distribuciones unidimensionales y discretas, en las que la posición de los elementos admite una representación gráfica sobre una línea recta.

Cabe comparar esas distribuciones, definidas matemáticamente unas, otras deducidas de medidas u observaciones, por medio de diagramas a modo de espectros; para ello ajustemos la escala de manera que en el espacio asignado entren en cada caso exactamente 100 rayas (*véase la figura 1*). La distancia media entre valores será la misma en todos ellos; las pautas, empero, varían mucho. Por ejemplo, en una serie relativa a la distribución de terremotos las rayas tienden a apiñarse, reflejo, sin duda, de algún mecanismo geofísico. Las fluctuaciones de frecuencia más baja observadas en los anillos de los árboles deben de tener causas tanto biológicas como climáticas. Por otra parte, vaya uno a saber por qué se distribuyen los puentes o túneles de una autovía como lo hacen.

Al analizar este tipo de pautas, poca esperanza cabe de pronosticar las posiciones de un elemento de una serie. Se busca una comprensión estadística, la descripción de una configuración típica, no la de una particular y concreta. Me centraré en dos medidas estadísticas: la distancia hasta el vecino más próximo y la función de correlación entre pares de puntos.

No hay distribuciones más sencillas que las periódicas. Imaginemos los barrotes de una verja o el monótono latido de un reloj de pared: los intervalos que median entre dos elementos consecutivos de la serie son exactamente iguales. El contrapunto de tal configuración regular y repetitiva sería una configuración aleatoria. Y entre estos extremos, el orden completo y el total desorden, existe una variedad de posibilidades intermedias, como una valla de barrotes o una columnata de columnas que "bailen", movidos al azar hacia acá o hacia allá unos centímetros.

La representación gráfica de las distancias al vecino más cercano permite distinguir fácilmente las configuraciones periódicas, aleatoria y "movida" (*véase la figura 2*). En el caso de la distribución periódica, la gráfica se reduce a un solo punto: la separación es, en todos los casos, la misma. Más interesante es el es-



1. CADA UNA DE ESTAS DISTRIBUCIONES unidimensionales consta de 100 niveles. Los espectros, de derecha a izquierda, corresponden a: una formación periódica de líneas equidistantes; una sucesión aleatoria; una formación periódica perturbada por un ligero "baile" aleatorio de cada nivel; los estados energéticos del núcleo del erbio-166, todos con los mismos números cuánticos de espín y paridad; los 100 autovalores centrales de una matriz simétrica aleatoria de orden 300; las posiciones de los ceros de la función zeta de Riemann situados justo por encima del cero 10^{22}-ésimo; un centenar de números primos consecutivos a partir de 103.613; la posición de las 100 variantes elevadas y soterradas más septentrionales de la autopista interestatal 85 estadounidense; posiciones de las traviesas de una vía muerta de ferrocarril; posiciones de los anillos de crecimiento, desde 1884 hasta 1983, de un abeto del Monte Santa Helena, estado de Washington; fechas de los terremotos de California de magnitud 5,0 o mayor entre 1969 y 2001; longitudes de 100 paseos consecutivos en bicicleta.

pectro de distancias al vecino más cercano en el caso de la distribución aleatoria: la frecuencia de una separación x cualquiera es proporcional a e^{-x}. Esta ley exponencial negativa entraña que la separación más probable entre valores es la mínima. A una pauta movida le corresponde una curva acampanada: los intervalos definidos por los vecinos más cercanos se atienen a una distribución gaussiana.

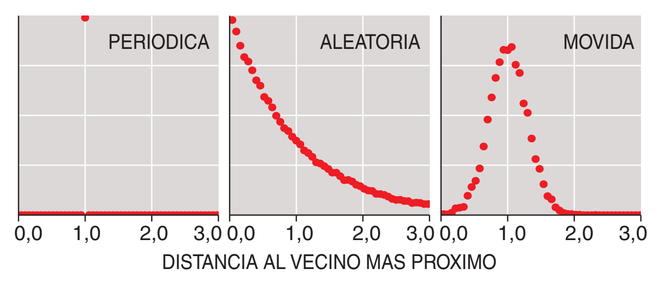
La función de correlación por pares mencionada por Montgomery y Dyson capta parte de la misma información que el espectro de los vecinos más cercanos, pero la calcula de diferente modo. La función de correlación cuenta, para cada distancia x, cuántos pares de valores están separados por x, sin que importe si corresponden a vecinos inmediatos o no. La función de correlación por pares de una distribución puramente aleatoria es una recta horizontal, pues todos los intervalos son equiprobables. Conforme la distribución se va haciendo más ordenada, aparecen en la función una serie de jorobas y ondulaciones. En el caso de una distribución periódica, la gráfica se compone de una serie de agudas puntas.

Hace treinta años, H. I. Liou, James Rainwater y sus colaboradores de la Universidad de Columbia midieron con gran precisión los niveles de energía del núcleo atómico de una "tierra rara", el erbio-166. Un examen superficial de ese espectro no percibirá regularidades evidentes; no obstante, su textura difiere mucho de la correspondiente a una distribución puramente aleatoria. En particular, el espectro del erbio tiene menor número de niveles muy próximos que una distribución aleatoria. Es como si los niveles de energía nuclear contaran con muelles que los mantuviesen separados. Esta "repulsión de niveles" caracteriza a todos los núcleos pesados.

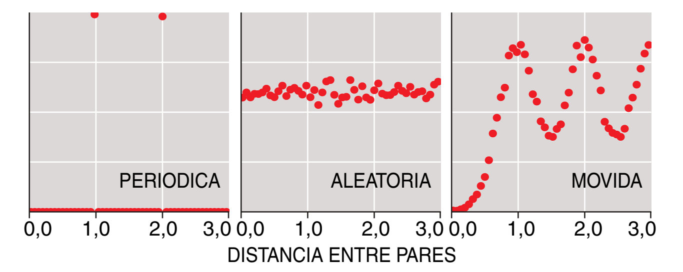
Erbio y autovalio

¿Qué tipo de estructura matemática podría describir un espectro así? Aquí es donde entran en la escena los autovalores, o valores propios, de las matrices hermíticas aleatorias mencionados al principio. Las enunció con esta finalidad, en el decenio de 1950, el físico Eugene P. Wigner, que también enseñó en Princeton. Imaginemos que se lo explica a un alumno un poco lento:

Wigner: Vamos a ver cómo se construye una matriz hermítica aleatoria. Empezamos con un casillero cuadrado, como un tablero de ajedrez, y en cada casilla ponemos un número elegido al azar...



2. LA DISTANCIA AL VECINO más próximo da un sencillo esbozo estadístico de una distribución. En el caso de una serie periódica, la curva tiene un único punto no nulo; si los valores son aleatorios, sigue una ley exponencial; la serie "movida" genera una gráfica de aspecto gaussiano.



3. LA FUNCION DE CORRELACION entre pares de puntos mide el número de pares de valores que están separados por una distancia dada cualquiera. En el caso de un conjunto aleatorio de valores, todos los intervalos son igual de probables, mientras que la curva correspondiente a una serie "movida" presenta un máximo en cada múltiplo de la media de la separación al vecino más próximo.

Estudiante: ¿Qué clase de número? ¿Real? ¿Complejo?

Wigner: Cualquiera de los dos sirve, pero, por sencillez, quedémonos aquí sólo con números reales.

Estudiante: ¿Y con qué tipo de aleatoriedad? ¿Han de tener distribución uniforme, gaussiana o...?

Wigner: Es costumbre tomarlos con una distribución gaussiana de media 0 y varianza 1, pero no es esencial hacerlo así. Lo esencial es que la matriz sea hermítica. Las matrices hermíticas —así llamadas en recuerdo del matemático francés Charles Hermite— poseen una simetría peculiar. Su diagonal principal, que va desde el ángulo superior izquierdo hasta el inferior derecho, viene a ser como un espejo, de manera que los elementos del triángulo superior quedan reflejados en el triángulo inferior.

Estudiante: Entonces la matriz no es aleatoria del todo, ¿verdad?

Wigner: Si se empeña usted, la llamaremos semialeatoria. Llenamos la mitad superior, con números reales, como hemos convenido para que sea más sencillo, tomados al azar, y después los copiamos en la mitad inferior. Tenemos así una matriz hermítica aleatoria y cuando calculamos sus autovalores...

Estudiante: Pero... ¿cómo hago para calcularlos?

Wigner: ¡Vaya a Matlab, el programa de ordenador, y utilice la función "eig"!

Los autovalores o valores propios reciben una diversidad de nombres, todos igualmente opacos: valores característicos, raíces latentes, espectro de la matriz. Las definiciones, por su parte, son también más numerosas que útiles. Aquí, para nuestro propósito, baste decir que toda matriz cuadrada $N \times N$ lleva asociada una ecuación polinómica de grado N, y que los autovalores son las raíces de tal ecuación (habrá, pues, N de ellos, distintos o no). En el caso de matrices cualesquiera, se tratará, en general, de números complejos, incluso aunque los elementos de la matriz sean números reales, pero la simetría de las matrices hermíticas garantiza que todos sus valores propios serán reales. Podremos, pues, ordenarlos de menor a mayor a lo largo de una recta, como si fueran niveles de energía. Dispuestos de esa forma, se parecen mucho a los niveles energéticos de un núcleo pesado. Claro está, los autovalores no coinciden, valor por valor, con el espectro de ningún núcleo particular, pero la semejanza estadística es grande.

La primera vez que oí hablar de la conjetura de la matriz aleatoria en física nuclear, lo que más me sorprendió no fue que pudiera ser cierta, sino que alguien se hubiese topado con ella. Pero no se trataba de una suposición excéntrica. En la formulación de la mecánica cuántica de Werner Heisenberg, el estado interno de un átomo, o de un núcleo, está representado por una matriz hermítica, cuyos autovalores son los niveles energéticos del espectro. Si conociéramos todos los elementos de cada fila y columna de esta matriz, podríamos calcular el espectro con toda exactitud. No tenemos, como es obvio, ese conocimiento, pero según la conjetura de Wigner los parámetros estadísticos del espectro no acusan una gran sensibilidad a los elementos específicos de la matriz. Por lo tanto, si nos limitamos a tomar una matriz típica —una matriz grande, cuyos elementos hayan sido elegidos atendiendo a una cierta distribución estadística—, las predicciones deberían ser aproximadamente correctas. Dyson y otros elaboraron después las predicciones del modelo con mayor detalle.

Eulerio y riemannio

Dejemos ahora la física nuclear y vayamos a la teoría de números y la función zeta.

La sucesión más famosa de la teoría de números es la de los números primos: 2, 3, 5, 7, 11... La tendencia general de esta sucesión es bien conocida. En las cercanías de cualquier número entero grande x, la proporción de números primos vale alrededor de $1/\log x$: aunque los primos prosiguen sin fin, se van enrareciendo conforme se avanza en la recta numérica. A esta cosecha cada vez más pobre se superponen fluctuaciones de menor escala, difíciles de comprender con detalle. La sucesión de números primos parece al azar y errática, y sin embargo no es posible que la distancia al vecino más próximo tenga la misma distribución estadística que un espectro de verdad aleatorio. La distancia mínima entre dos números primos (exceptuado un caso anómalo) es 2. Los pares separados por esta distancia mínima, como 29 y 31, se llaman primos gemelos. No se sabe todavía si hay una infinidad de ellos.

Para analizar esta distribución, aparte de explorar directamente los números primos, cabe tomar un rodeo: la función zeta de Riemann. Esta función, parte de cuyo nombre le fue dado por el propio Bernhard Riemann, la otra en honor suyo, había sido estudiada ya por Leonhard Euler en el siglo XVIII, quien la definió como la suma, extendida a todos los números naturales, de la siguiente serie:

$$\zeta(s) = \sum_n \frac{1}{n^s}$$

Con otras palabras, se toma cada número natural n, desde 1 hasta infinito, se le eleva a la potencia s, se toma el valor recíproco y se suma toda la serie. La suma es finita siempre que s sea mayor que 1. Por ejemplo, Euler demostró que $\zeta(2)$ es igual a $\pi^2/6$, aproximadamente, 1,645:

$$\zeta(2) = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2} + \cdots = \frac{\pi^2}{6}$$

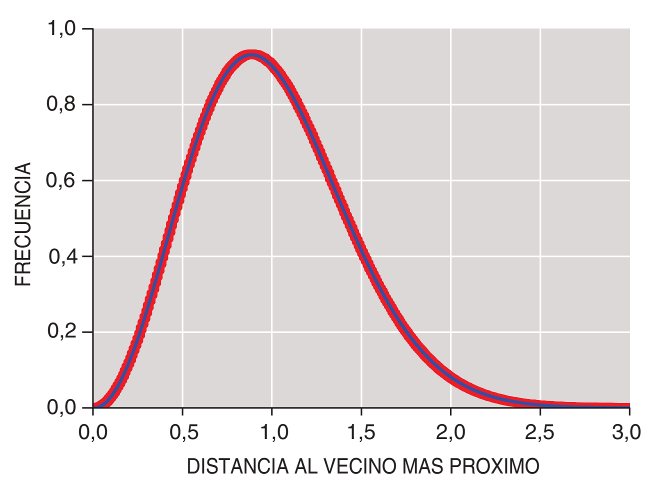
Euler demostró también una notable identidad que iguala la fórmula del sumatorio, que tiene un término por cada número natural, a un producto infinito que contiene un factor por cada número primo. Esta segunda definición establece:

$$\zeta(s) = \prod_p \left(1 - \frac{1}{p^s}\right)^{-1}$$

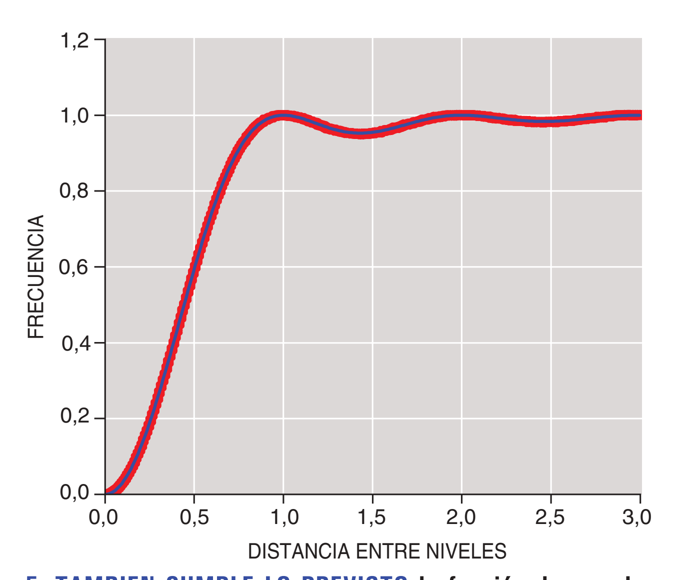
En este caso, la receta consiste en tomar cada número primo p, desde 2 hasta infinito, elevarlo a la potencia s, y después, tras algunos cálculos aritméticos, multiplicar los factores correspondientes a todos los valores de p. El resultado es el mismo que en la suma infinita. La conexión entre una suma extendida a todos los enteros y un producto sobre todos los números primos era ya un indicio de que la función zeta podría tener algo que decir sobre la distribución de los números primos en el conjunto de los enteros. Las dos series, en efecto, están íntimamente relacionadas.

La contribución de Riemann, en 1859, consistió en extender el dominio de la función zeta, de modo que fuera aplicable no sólo cuando s es un número real mayor que 1, sino cuando s es un número cualquiera —positivo o negativo, real o complejo—, con la única excepción de los números cuya parte real es igual a 1. La función oscila desmesuradamente sobre gran parte del plano complejo, cruzando infinitas veces de los valores positivos a los negativos. Se llama a los puntos de cruce, donde $\zeta(s) = 0$, "ceros de la función zeta". Existe una sucesión infinita de estos ceros a lo largo del eje real negativo, a los que no se concede gran interés. Riemann llamó la atención sobre una diferente sucesión infinita de ceros, situados por arriba y por debajo del eje real en la franja vertical del plano complejo que contiene a todos los números cuya parte real se encuentra entre 0 y 1. Riemann calculó la posición de los tres primeros de estos ceros y descubrió que se hallan justamente en el centro de la franja, sobre la "recta crítica" formada por los complejos cuya parte real es 1/2. Riemann, basándose en esta evidencia y en su increíble intuición, conjeturó que *todos* los ceros complejos de la función zeta se encuentran sobre la recta crítica. Esta conjetura es la llamada "hipótesis de Riemann", ampliamente tenida por el hueso más duro de roer y jugoso de toda la matemática contemporánea.

En los años transcurridos desde que Riemann consiguió localizar los tres primeros ceros de la función zeta, han sido descubiertos unos poquitos más. Una red de cómputo cooperativo llamada ZetaGrid, organizada por Sebastian Wedeniwski, de IBM, ha comprobado 385.000 millones de ellos. Hasta el momento, todos se encuentran en la recta crítica. Existe incluso una demostración de que la recta crítica contiene una infinidad de tales



4. LOS CEROS DE LA FUNCION ZETA de Riemann presentan separaciones al vecino más próximo que satisfacen cerca las predicciones de la teoría de matrices aleatorias. Los puntos rojos representan las posiciones de mil millones de ceros de zeta situados por encima del 10^{23}-ésimo de tales ceros; la línea azul corresponde a la separación prevista. Según datos de Andrew M. Odlyzko.



5. TAMBIEN CUMPLE LO PREVISTO la función de correlación de pares de puntos correspondiente a mil millones de ceros de zeta cercanos al 10^{23}-ésimo. La curva teórica, azul, es la función $1 - (\text{sen}(\pi x)/\pi x)^2$, de la que hablaron Montgomery y Dyson en 1972. Obsérvense los indicios de "repulsión de nivel": los ceros poco separados son raros. Según datos de Andrew M. Odlyzko.

ceros, pero lo que se necesita es una demostración de que no hay ninguno situado fuera de ella. Tal objetivo sigue estando fuera de nuestro alcance.

Otros aspectos de la función zeta han sido objeto de escrutinio en el ínterin. Suponiendo que todos los ceros se encuentren verdaderamente sobre la recta crítica, ¿cómo se distribuyen a lo largo de ella? ¿Cómo varía su densidad en función de la "elevación", T, por encima o por debajo del eje real?

La tendencia general de la abundancia de ceros de la zeta, como la de los primos, es conocida. Va en sentido contrario a la de éstos: mientras que los números primos son cada vez más raros a medida que crece su tamaño, los ceros de zeta van siendo más frecuentes al ir aumentando la altura. El número de ceros en el entorno de una altura T es proporcional a $\log T$, lo que entraña un incremento lento. Pero, como ocurría con los primos, tal tendencia no es regular, y los detalles de la fluctuación son de suma importancia. Los huecos y los apiñamientos en la sucesión de ceros de zeta codifican información sobre propiedades correspondientes de la sucesión de los números primos.

El trabajo de Montgomery sobre la función de correlación de pares de puntos de los ceros de zeta constituyó un paso importante para comprender la estadística de la fluctuación. Y el encuentro en Fuld Hall, en el que salió a la luz que la fórmula de correlación de Montgomery es la misma que la correspondiente para los valores propios de las matrices aleatorias, fue la chispa que encendió un renovado interés. La función de correlación implica una repulsión entre niveles de los ceros, exactamente igual que ocurre en los núcleos, con la consiguiente deficiencia de ceros muy poco separados.

El resultado de Montgomery no es un teorema: su demostración se apoya en la presunta veracidad de la hipótesis de Riemann. Pero la exactitud de la función de correlación se puede verificar mediante la comparación de la predicción teórica con los valores computados de los ceros de zeta. M. Odlyzko ha llevado a lo largo de los veinte últimos años la computación de los ceros de zeta hasta cimas heroicas con el fin de realizar tales comprobaciones. No basta para tal propósito la comprobación de que los ceros yacen sobre la recta crítica; el programa ha de medir con precisión la altura de cada cero en dicha recta, tarea mucho más exigente. Uno de los primeros trabajos de Odlyzko llevaba por título "El cero número 10^{20} de la función zeta de Riemann y 175 millones de sus vecinos". Desde entonces ha procedido a computar series todavía más largas de ceros consecutivos, situados a alturas todavía más elevadas, y explora en la actualidad el entorno del cero de lugar 10^{23}. La concordancia entre las correlaciones pronosticadas y sus medidas es verdaderamente notable; mejora al aumentar la altura.

El operador del universo

Esta aparente vinculación entre los autovalores matriciales, la física nuclear y los ceros de la función zeta, ¿será mera chiripa? Pudiera ser, aunque a un universo donde se produjesen de forma casual tales coincidencias podría considerársele todavía más extraño que a uno con conexiones causales misteriosas.

Otra explicación posible es que la distribución estadística observada en estos tres casos (y en varios otros que no he mencionado) constituye simplemente una forma muy habitual de organización de las cosas, algo análogo a la distribución normal de Gauss, que se presenta por doquier en la naturaleza porque abundan los procesos que conducen a ella. Siempre que se suma un gran número de aportaciones independientes, el resultado es la conocida curva acampanada de la distribución gaussiana. Tal observación constituye, en esencia, el teorema del límite central. Es posible que algún principio semejante sea responsable de la ubicuidad de la distribución de autovalores. En tal caso, el hecho de que Montgomery y Dyson hayan dado con la misma función de correlación no sería, a fin de cuentas, un gran milagro.

Un punto de vista distinto presume que los ceros de la función zeta representan un verdadero espectro: una serie de niveles energéticos como los del núcleo del erbio, aunque generados por un elemento ficticio, definido matemáticamente, el "riemannio" (lo conocí por una conferencia de Oriol Bohigas, de la Universidad de París-Sur). Tal idea se remonta a David Hilbert y a George Pólya, quienes sugirieron (cada uno por su lado) que los ceros de la función zeta pudieran ser los valores propios de un "operador" hermítico desconocido. A primera vista, la noción de operador parece muy alejada del concepto de matriz, pues se trata de una función que actúa sobre funciones. Pero los operadores lineales también tienen autovalores, y un operador hermítico posee unas propiedades de simetría que hacen que todos los suyos sean números reales, exactamente como en el caso de una matriz hermítica.

Si la conjetura de Hilbert-Pólya fuese correcta, el éxito de los métodos basados en matrices aleatorias se debería, en esencia, a la misma razón por la que dan buenos resultados en física nuclear, a saber, que la estructura fina de una matriz grande (u operador) tiene menor importancia que sus simetrías globales, por lo que cualquier matriz típica que posea las simetrías debidas producirá resultados estadísticamente similares. Tras estas aproximaciones acecha algún operador hermítico bien determinado, que detxxermina la posición exacta de todos los ceros de la función zeta y, en consecuencia, la distribución de los números primos.

Bibliografía complementaria

RANDOM MATRICES. Madan Lal Mehta. Segunda edición. Academic Press; Boston, 1991.

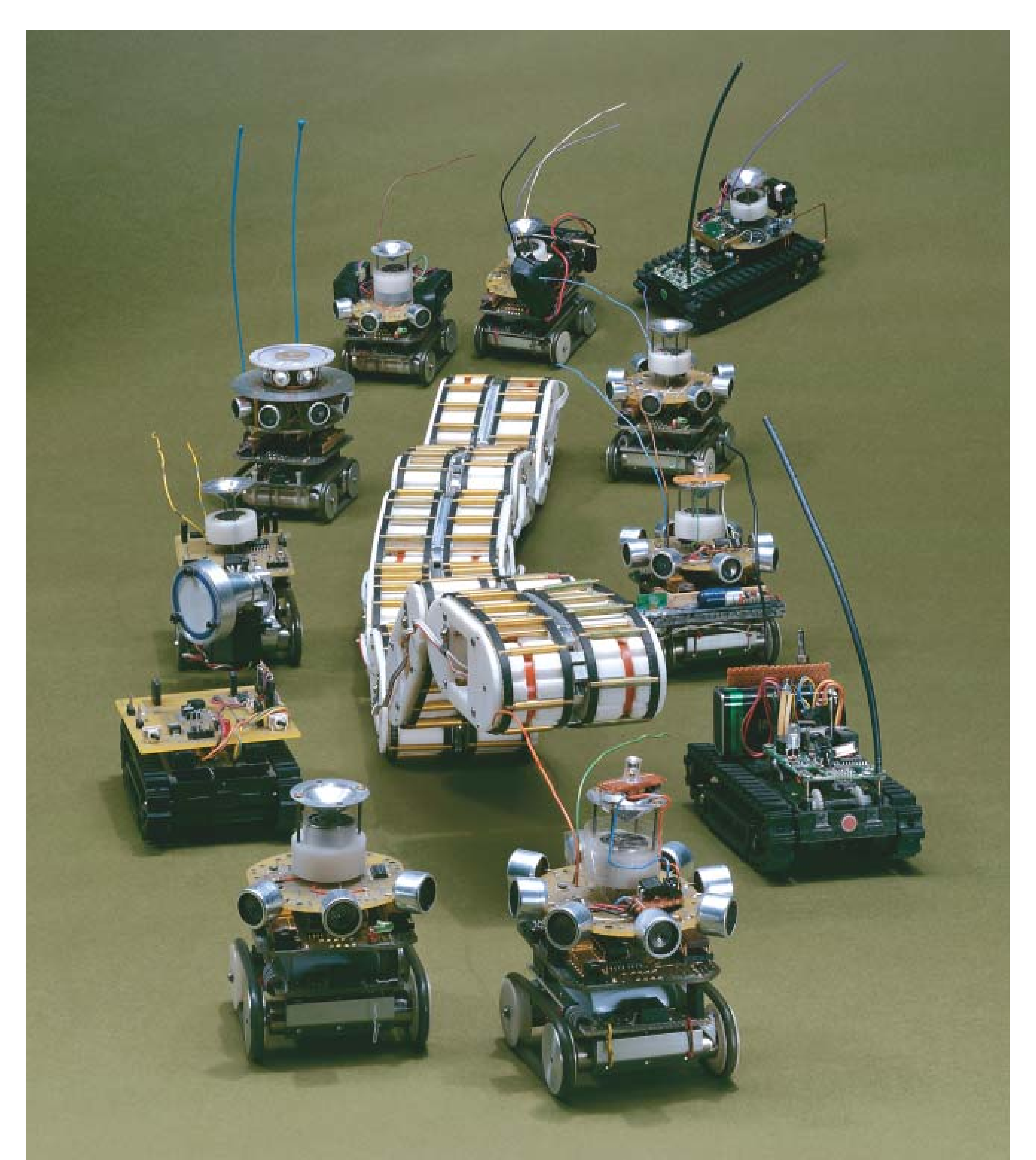
THE RIEMANNIUM. P. Leboeuf, A. G. Monestra y O. Bohigas en *Regular and Chaotic Dynamics*, vol. 6; págs. 205-210; 2001.

PATTERNS IN EIGENVALUES. THE 70TH JOSIAH WILLARD GIBBS LECTURE. Persi Diaconis en *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 40, págs. 155-178; 2003.

Enjambres de robots

Para los diseñadores de robots de hoy día, lo pequeño no sólo es hermoso, sino que ofrece grandes posibilidades

Robert Grabowski, Luis E. Navarro Serment y Pradeep K. Khosla



MARK PORTLAND

DARPA (la agencia estadounidense de proyectos avanzados para la defensa) planteó en 1998 un problema a los investigadores de la robótica. Debían crear unos robots de reconocimiento tan diminutos, que a un soldado le fuera posible llevarlos consigo y esparcirlos por el suelo como si fueran semillas. Los servicios de bomberos y los equipos de búsqueda y rescate podrían arrojarlos al interior de viviendas o edificios derrumbados para localizar a posibles víctimas atrapadas en su interior o encontrar materiales tóxicos. No está hoy a nuestro alcance algo así. Sin embargo, los minirrobots han merecido la atención de los principales proyectistas. En lugar de centrarse en unas cuantas plataformas grandes, repletas de sensores, se aplican a la construcción de flotillas de robots sencillos, ligeros y pequeños.

En principio, estos robots diminutos presentarían numerosas ventajas sobre sus parientes más voluminosos. Podrían infiltrarse por el interior de las conducciones, inspeccionar ruinas tras una catástrofe o agazaparse en lugares poco conspicuos. Un grupo de ellos, bien organizado, intercambiaría la información de sus sensores con el fin de cartografiar objetos que no resultasen fáciles de comprender desde un solo punto de observación. Cuando uno cayese o hubiera de escalar un obstáculo, otros le ayudarían. El responsable del grupo decidiría el número oportuno de robots según la situación. Si uno de los robots sufre una avería, no por ello se perdería la misión entera: los demás pueden continuarla.

Para construir robots diminutos hay que recurrir a nuevos planteamientos en el diseño. A diferencia de lo que ocurre con los de mayor tamaño, para ellos tanto el espacio como la fuerza motriz son bienes escasos; no pueden albergar todos los componentes necesarios para llevar a cabo una misión dada. A un robot pequeño, una cámara de vídeo, por pequeña que sea, le pesará demasiado. Los sensores, los sistemas de procesamiento de datos y la potencia física han de repartirse entre varios robots que trabajen al unísono, como las hormigas en el hormiguero: débiles y vulnerables una a una, poderosas cuando unen sus fuerzas.

Una variedad de formas

Han sido varios los métodos adoptados para abordar los problemas de la construcción de robots a esa escala; entre ellos, el "biológico", que trata de remedar atributos de los insectos o de otros animales. Así, por ejemplo, los proyectistas de robots de la Universidad Case-Reserva del Oeste han desarrollado una plataforma de gran movilidad inspirada en la cucaracha. Unos mecanismos híbridos de ruedas y patas le permiten el desplazamiento por terreno desigual. Un equipo de la Universidad de Michigan en Ann Arbor ha producido un robot bípedo con extremidades articuladas y provistas de ventosas con las que puede trepar por paredes, a semejanza de una oruga.

La biología ha inspirado no sólo la configuración física de los robots, sino también sus sistemas de control. Los ingenieros de robótica del Instituto de Tecnología de Massachusetts han inventado robots del tamaño de pelotas de golf, que merodean en busca de alimento como si fueran hormigas. Se valen de sencillos sensores de luz para expresarse "emociones" unos a otros y tomar decisiones de forma colectiva. Esas investigaciones siguen la senda abierta por Rodney A. Brooks. En los algoritmos de control basados en la conducta, de los que Brooks fue precursor, cada robot reacciona a los estímulos locales. No hay un plan central, ni un coronel al mando de las tropas; la mera interacción de los robots genera la actuación final del equipo. Por innovador que pueda ser este enfoque, subsisten muchos problemas. Aún no ha dado fruto. Las misiones que tienen una finalidad requieren acciones deliberadas y planes concebidos al efecto; la conducta "espontánea" no puede proporcionar ni lo uno ni lo otro, al menos por ahora.

La Universidad de Minnesota ha montado robots "exploradores" que se pueden arrojar a través de las ventanas como si fuesen granadas de mano. Estos dispositivos, dotados de dos ruedas, tienen forma de lata de conservas y están equipados con cámaras de vídeo que permiten a un usuario controlarlos a distancia. Análogamente PARC (antes Xerox PARC), de Palo Alto, en California, ha creado un robot-sierpe muy articulado que se puede dirigir a distancia mediante vídeo. Este robot repta sobre los obstáculos o por el interior de cañerías. No obstante, en la actualidad adolece, al igual que los robots exploradores, de insuficiente capacidad sensorial local: ha de ser un operador humano quien tome las decisiones. Tal inconveniente hace poco práctica, hoy por hoy, la utilización de enjambres de robots de este tipo.

A lo largo de estos últimos años se han comercializado varias plataformas robóticas. Khephera, un robot del tamaño de un disco de hockey desarrollado en Suiza, se ha hecho popular entre los interesados en los procesos de control basados en la conducta. El método vale también para jugar. La compañía californiana Living Machines ha sacado a la venta un diminuto robot programable, el Pocket-Bot. Lego Mindstorms, de Lego, el fabricante de construcciones de juguete, pone al alcance del público general la construcción y manejo de robots sencillos, que ya se utilizan en algunas escuelas. Pero los sensores y la capacidad de control de estos diseños comerciales siguen siendo muy rudimentarios.

1. LOS MILIBOTS, pequeños robots construidos por los autores de este artículo, han de trabajar en equipo; cuentan con tan poco espacio, que no pueden hacer gran cosa solos. La "oruga" blanca central es una cadena de milibots engarzados para subir escaleras. La escoltan otros tipos de milibots, cada uno preparado para una tarea concreta.

Escasez de energía

En la Universidad Carnegie Mellon hemos hecho hincapié en la flexibilidad de movimientos. Hemos construido un equipo de una docena de “milibots”; cada uno mide unos cinco centímetros de lado. A esa escala ya nos fue posible utilizar componentes comerciales para las tareas de procesamiento y de control, aunque todavía hubimos de diseñar a la medida los circuitos impresos y los elementos controladores. Cada robot consta de tres módulos principales: de locomoción, de control y de sensores. El módulo de locomoción se encuentra en la parte inferior. Sus dos motores accionan orugas construidas con pequeñas juntas tóricas. La versión actual puede desplazarse por el suelo del despacho y sobre las alfombras a una velocidad máxima de unos 20 cm/seg (alrededor de la sexta parte de la velocidad normal de marcha de una persona). Si desarrollamos nuevos módulos de movilidad, podremos encajarlos sin necesidad de rediseñar el resto del robot.

El módulo central tiene a su cargo el procesamiento y el control. El diseño actual contiene un microcontrolador de ocho bits, similar a los incluidos en los ordenadores personales de hace 20 años. Aunque su potencia no sea comparable con la de un ordenador moderno, estos procesadores pueden todavía encargarse del control del robot en tiempo real. El módulo de sensores, situado en lo alto, dispone de sensores de sónar y de infrarrojo cercano para medir la distancia a obstáculos vecinos, así como sensores de la banda media del infrarrojo (como los utilizados en los detectores de movimiento) destinados a percibir cuerpos por su calor; porta también una cámara de vídeo para vigilancia y un radiomódem para la comunicación con otros robots o con la base.

La limitación más seria que sufren estos y otros pequeños robots es la energía motriz. Las baterías, voluminosas y pesadas, no se adaptan bien al cambio de escala: llega un momento, cuando se reduce su tamaño, en que las baterías ya no pueden suministrar ni la energía necesaria para mover su propio peso. Las



2. UN ROBOT que cabe en la mano: uno de los autores (Grabowski) sostiene un milibot. Mediante componentes prefabricados no se puede diseñar uno menor.

MARK PORTLAND

dos baterías recargables NiMH de teléfono móvil de nuestros milibots ocupan alrededor de la tercera parte del espacio disponible. La energía que suministran sólo da para alimentar un limitado sistema de sensores durante un tiempo de funcionamiento de 30 a 90 minutos, dependiendo de la complejidad de la misión. Con unas baterías mayores, se alargaría el tiempo de servicio, pero habría que eliminar componentes necesarios. El diseño de robots pequeños es el arte del toma y daca. La velocidad, la duración y la funcionalidad compiten con el peso, el tamaño y la disponibilidad de componentes.

Para habérnoslas con estas limitaciones hemos adoptado dos principios de diseño de milibots: la especialización y la colaboración. La primera significa que el robot está equipado justo con los sistemas sensores y de procesamiento necesarios para una tarea específica, lo que permite dar uso óptimo al espacio y a la energía disponibles. En una misión típica, a ciertos milibots se les asigna la tarea de elaborar mapas de las inmediaciones. Otros se encargan de proporcionar información instantánea al operador humano, o bien, de portar sensores específicos para esa misión. Para llevar a término la tarea, los robots tienen que cooperar.



- Los robots pequeños llegarán algún día a complementar a sus congéneres más voluminosos y caros. Robots del tamaño de un coche en miniatura podrían deslizarse por el interior de cañerías o reptar por entre los escombros de un edificio desplomado, capacidades muy útiles para las operaciones de espionaje, vigilancia o de búsqueda y rescate.
- Los pequeños robots, limitados por el tamaño y la potencia de sus baterías, no poseen las capacidades de que dispone un solo robot grande. Tienen que dividirse las tareas y trabajar cooperativamente, en equipo, cosa menos sencilla de lo que pueda parecer. Los ingenieros han tenido que desarrollar nuevas técnicas para la determinación de la posición y la cartografía del territorio.

¿En dónde nos encontramos?

La determinación del lugar donde se encuentran los componentes del equipo exige colaboración. Los robots grandes pueden permitirse el lujo de utilizar diversas técnicas para establecer su posición: receptores de GPS (sistema mundial de localización), balizas fijas o el reconocimiento visual de hitos del terreno. Disponen, además, de la potencia de cómputo suficiente para cotejar con mapas preexistentes la información que le proporcionan sus sensores.

Ninguna de estas técnicas resulta adecuada para robots diminutos. El alcance de sus sensores es limitado: el sónar de un milibot sólo puede medir distancias de hasta un par de metros. Son demasiado pequeños para llevar a bordo unidades de GPS. Su reducido peso frustra la estima o medición de la posición a partir de

LA ORIENTACION DE LOS ROBOTS

ANATOMIA DE UN ROBOT

Transductor ultrasónico. Detecta las señales de sónar procedentes de cualquier dirección

Transpondedor de sónar. Envía impulsos de ultrasonidos para la medición de distancias

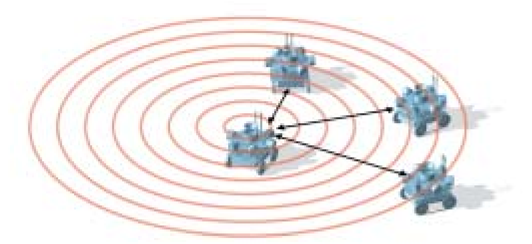
Nivel superior. Porta los sensores

Nivel central. Contiene dos microcontroladores y un radiomódem de 4800 baudios

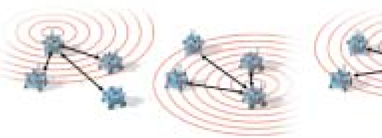
Nivel inferior. Contiene dos motores, dos diferenciales, odómetros y baterías

DETERMINACION DE LA SITUACION

Uno de los robots envía simultáneamente un impulso ultrasónico y otro electromagnético. Los demás reciben instantáneamente el impulso electromagnético; el ultrasónico les llegará un poco más tarde. La diferencia de tiempos permite medir la distancia.



Los robots se turnan en la emisión y la recepción de impulsos.



Un ordenador deduce de las mediciones de distancia las posiciones de cada robot. Entre otras dificultades, una disposición especular generaría el mismo sistema de distancias.



Esta ambigüedad se resuelve haciendo que uno de los robots gire hacia la izquierda. La medición de su nueva posición permite discriminar cuál de las dos disposiciones simétricas corresponde a la situación real.

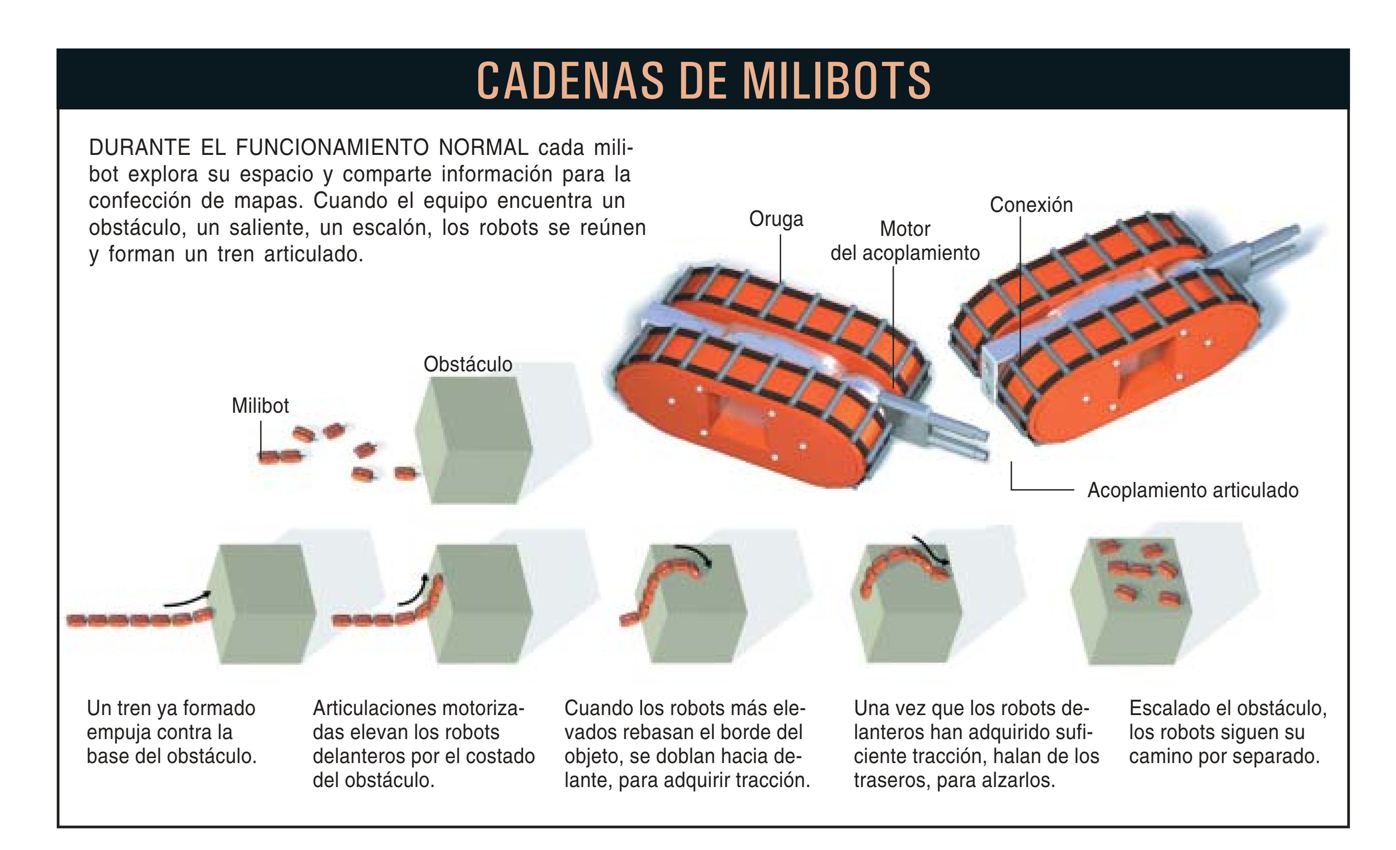


EL CARTOGRAFIADO

Los milibots, que sirven como puntos de referencia unos de otros, están capacitados para orientarse en territorio desconocido. En este ejemplo, tres robots quedan fijos y sirven de balizas. El cuarto explora la zona valiéndose de su sónar. Concluida su exploración, los robots intercambian sus papeles. Los robots más adelantados pasan a ser las nuevas balizas y el más rezagado deambula y recoge datos. Los mapas así recopilados pueden integrarse en un mapa mayor que cubra la zona entera.



BRYAN CHRISTIE DESIGN



la velocidad de la rueda. Cosas en apariencia tan irrelevantes como el sentido de la trama de una moqueta pueden influir mucho en su movimiento, haciendo que las mediciones odométricas sean imprecisas, al igual que el odómetro de un coche daría mediciones erróneas si rodase sobre un lago helado.

Hemos tenido, pues, que idear una técnica nueva. Hemos elaborado una versión en miniatura del GPS. En lugar de satélites, nos valemos de ondas sonoras para medir las distancias entre los robots del grupo. Cada milibot está equipado, además de con un radiomódem, con un transductor ultrasónico. Para determinar la distancia, el milibot emite simultáneamente un impulso de radio y una señal ultrasónica, que se expanden en todas las direcciones. La onda de radio, que viaja a la velocidad de la luz, llega casi al instante. El sonido, que se propaga a unos 340 metros por segundo, tarda unos pocos milisegundos más, según la distancia que medie entre el robot que envía la señal y el que la recibe. Una pieza metálica, de forma cónica, emplazada sobre el módulo sensor refleja y desvía hacia abajo los ultrasonidos y los lleva a un transductor, lo que permite a los robots detectar sonidos procedentes de cualquier dirección. Viene a ser como medir la distancia a una tormenta cronometrando el tiempo entre el relámpago y el trueno.

Los robots pueden calcular la distancia que hay entre ellos alternando los papeles de emisor y receptor. El proceso completo de medición lleva unos 30 milisegundos. El líder del equipo, ya sea la base o un robot mayor —tal vez el que desplegó los milibots—, recopila toda la información y calcula por trilateración las posiciones de cada uno de los miembros. La trilateración se parece a una técnica más conocida, la triangulación; difiere de ella en que para determinar las posiciones no recurre a las orientaciones angulares, sino a las distancias. En dos dimensiones, cada estimación de distancia indica que otro robot se encuentra en algún punto de una circunferencia centrada en el robot emisor. La intersección de dos o más círculos señala la posible ubicación de otros robots (*véase el recuadro* “La orientación de los robots”). El algoritmo determina la distribución de robots que mejor encaja con todas las intersecciones de círculos y mediciones de distancias.

El procedimiento se complica si hay más de una distribución de robots que concuerde con los datos. Otro inconveniente: las medidas de distancias son propensas a errores e incertidumbres. El reflejo de las señales ultrasónicas en suelos y paredes crea ambigüedades. Dependiendo de la disposición geométrica, las interferencias entre las ondas borran incluso la señal por completo. Por esta razón hemos desarrollado un algoritmo que combina la telemetría ultrasónica con la estima, porque ésta, a pesar de sus problemas, proporciona información adicional suficiente para resol-

Los autores

ROBERT GRABOWSKI, LUIS E. NAVARRO SERMENT y PRADEEP K. KHOSLA colaboran en el proyecto milibot desde el verano de 1999. Khosla dirige el departamento de ingeniería eléctrica e informática de la Universidad Carnegie Mellon. Desarrolló los primeros brazos manipuladores de tracción directa, hoy utilizados en la mayoría de las fábricas automatizadas. Grabowski y Navarro Serment están realizando sus tesis doctorales.

ver las ambigüedades. El algoritmo evalúa el error de medición y computa el conjunto de posiciones de los robots que minimiza el error total.

La ventaja de este método de localización es que con él los milibots no necesitan de puntos de referencia fijos para navegar. Pueden penetrar en un ambiente desconocido y explorarlo por sí mismos. Durante el cartografiado, actúan como balizas unos cuantos de entre los milibots. Estos robots permanecen estacionarios mientras los demás se desplazan por el lugar, cartografían y eluden los obstáculos, al tiempo que miden sus propias posiciones relativas con respecto a los faros. Cuando el equipo ha explorado el área que rodea las balizas, los robots se intercambian los papeles. En una especie de juego de pídola, los exploradores toman posiciones y hacen de faros, mientras ahora las balizas de antes exploran. La ejecución de esta técnica no requiere de intervención humana.

Cadena de mando

Los obstáculos ofrecen a los robots pequeños un motivo más para la colaboración. Debido a su tamaño, un robot pequeño es muy sensible a la aleatoria barahúnda entre la que se desarrollan nuestras vidas. Ha de habérselas con piedrecillas, polvo o pedazos de papel. Un milibot corriente se alza unos 15 mm sobre el suelo; un lápiz o una ramita pueden interrumpir su camino. Para superar estas limitaciones hemos ideado unos milibots de nuevo cuño que se acoplan como los vagones de tren. Miden unos 11 cm de largo por 6 de ancho y recuerdan a los primitivos tanques de la Primera Guerra Mundial. De ordinario merodean por separado, cada uno por su cuenta; tienen la flexibilidad de movimientos suficiente para pasar sobre pequeños obstáculos. Pero cuando necesitan salvar una zanja o un tramo de escalera pueden acoplarse entre sí y formar una cadena.

La característica que confiere variedad de movimientos a la cadena es una junta especial de acoplamiento entre los milibots. A diferencia del enganche entre vagones o entre un coche y su remolque, el del milibot cuenta con un potente motor, capaz de girar la articulación hacia arriba o abajo con el par suficiente para alzar a varios milibots. Si ha de trepar por una escalera, la cadena empuja contra la base del primer peldaño. Uno de los milibots situados cerca del centro de la cadena levanta la parte frontal de la misma. Aquellos milibots que alcanzan lo alto del obstáculo pueden entonces tirar de los situados abajo (*véase el recuadro* "Cadenas de milibots"). En el presente, el proceso se gobierna mediante control remoto, pero la cadena debería llegar a subir escaleras automáticamente.

La atención de los investigadores empieza a no centrarse ya tanto en los aparatos mismos como en el diseño de sistemas de control más eficaces. No habrá que dirigir unos cuantos robots, sino centenares o millares, un problema radicalmente diferente que exigirá conocimientos tomados de campos afines, como la economía, la logística militar e incluso las ciencias políticas.



RICHARD VOYLES *Universidad de Minnesota*

3. ESTE ROBOT podría lanzarse por una ventana; una vez en el suelo, merodearía. El TerminatorBot, variante de los "robots exploradores" diseñada por un equipo de la Universidad de Minnesota, es algo menor que una lata de cerveza. Dispone de dos brazos con los que puede avanzar, subir escaleras y manipular objetos.

Una de las vías que contemplamos para el control a gran escala de sistemas robóticos es la jerarquización. Los robots, lo mismo que en el ejército, se distribuirían en equipos más reducidos controlados por un jefe local. Este líder sería responsable ante una autoridad superior. Los milibots están siendo ya dirigidos por robots mayores, que recuerdan a tanques, cuyos procesadores Pentium son capaces de habérselas con los complejos cálculos que exigen la cartografía y la localización. Estos robots mayores pueden llevar a remolque toda una ristra de milibots y, en caso necesario, desplegarlos en zonas de interés. Por su parte, han de dar cuenta de sus actos a los vehículos robóticos todoterreno de nuestro grupo, que cuentan con múltiples ordenadores, cámaras de vídeo, unidades GPS y una autonomía de cientos de kilómetros. La idea es que los robots mayores desplieguen los menores en las áreas donde les resulten inaccesibles, manteniéndose en las cercanías para proporcionar apoyo y dirección.

Bibliografía complementaria

BEHAVIOR-BASED ROBOTICS (INTELLIGENT ROBOTICS AND AUTONOMOUS AGENTS). Ronald C. Arkin. MIT Press, 1998.

HETEROGENEOUS TEAMS OF MODULAR ROBOTS FOR MAPPING AND EXPLORATION. Robert Grabowski, Luis Navarro Serment, Christopher J. Paredis y Pradeep K. Koshla, en un número extraordinario dedicado a los sistemas multirrobóticos heterogéneos de *Autonomous Robots*, vol. 8, n.º 3, páginas 293-308; junio de 2000.

MILLIBOTS TRAINS FOR ENHANCED MOBILITY. H. Benjamin Brown, J. Michael Vande Weghe, Curt A. Bererton y Pradeep K. Koshla en *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, n.º 4, páginas 452-461; diciembre de 2002.

Teoría de cuerdas

Reflexiones informales sobre su futuro

En los últimos años, el principio holográfico ha alcanzado aún más prominencia y credibilidad. Hacia la mitad de los años noventa, a poco de enunciarse, se empieza a constituir un complejo de ideas holográficas, basadas en las características de los agujeros negros, de una naturaleza abstracta y más bien vaga: la entropía de los agujeros negros reside en su superficie; por tanto, quizá residan también en ella sus grados de libertad (las variables que caracterizan por completo a un sistema); puede que valga esto mismo para cualquier región con un horizonte, que valga incluso para los horizontes cosmológicos. Quizá, pues, estemos viviendo en una región cósmica cuyos verdaderos grados de libertad se hallan lejos. Ideas de una rareza maravillosa, pero sin mucho que las respaldase.

Pero esto cambia cuando se tiene en cuenta el trabajo de Juan Maldacena (del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton). Encontró en la propia teoría de cuerdas un ejemplo explícito donde la física del volumen —el ámbito que consideramos real— se refleja con exactitud en la física de una superficie. Ambas descripciones diferirían muchísimo en sus detalles concretos, pero no cabría discriminar entre ellas sólo por su capacidad de expresar fielmente lo que pasa. Una dispondría de cinco dimensiones, la otra de cuatro: parece que ni siquiera cabe determinar el número de dimensiones, ya que habría descripciones alternativas que reflejarían con la misma fidelidad los fenómenos físicos que se observan.

A mi modo de ver, las ideas abstractas se convierten gracias a ese resultado en algo concreto, que nos empuja a creer en ellas. E incluso aunque los detalles de la teoría de cuerdas cambien, pienso, como muchos otros —aunque no todos—, que la idea holográfica persistirá y nos guiará. Si es verdaderamente *la* idea, no lo sé. No lo creo. Pero bien podría ser uno de los hitos en el camino hacia lo esencial de la teoría.

Gravedad cuántica de bucles

La gravedad cuántica de bucles ha hecho tremendos progresos. Aún hay muchas cuestiones, muy fundamentales, que no pienso que haya resuelto satisfactoriamente, por lo menos para mí. Dista de ser imposible que, siguiendo los de las cuerdas nuestro camino hacia la gravedad cuántica y los teóricos de los bucles el suyo, al final unos y otros confluyamos en un mismo lugar.

Un punto débil de la teoría de cuerdas es su "dependencia del fondo". Debe partir de un espaciotiempo preexistente en el que se mueven las cuerdas. Pero se esperaría, sin embargo, que el espaciotiempo emergiera de las ecuaciones fundamentales de una verdadera teoría cuántica de la gravedad. Los de la gravedad cuántica de bucles, en cambio, cuentan con una formulación independiente del fondo: su espaciotiempo emerge de la propia teoría. Por otro lado, los de las cuerdas entramos en contacto muy directo con la relatividad general de Einstein a escalas grandes. La vemos en nuestras ecuaciones. Los de los bucles tienen alguna dificultad para contactar con la gravedad ordinaria. Quizá se podrían sumar las fortalezas de cada teoría; parece bastante natural.

Pese a su dependencia del fondo espaciotemporal, la teoría de cuerdas va aclarando poco a poco la naturaleza profunda del espacio y el tiempo. Así, hemos descubierto la simetría de espejo (no debe confundirse con la simetría entre un objeto y su imagen especular; aquí la expresión se refiere al efecto de una transformación que deja inmutadas las leyes físicas pero modifica el espaciotiempo): puede haber dos espaciotiempos, pero una sola física. Hemos aprendido que el microcosmos quizá se rija por una geometría no conmutativa, en la que la multiplicación de coordenadas, al contrario de lo que sucede con los números reales, depende del orden en que se haga.

La simetría de espejo [una de las principales contribuciones de Greene, hará una docena de años] no divorcia por completo el espaciotiempo de la geometría



Si fuéramos una cuerda, el espaciotiempo nos parecería algo así: con seis dimensiones extra curvadas

(cuya conexión es el meollo del programa einsteiniano). Sólo indica que se está olvidando la mitad de la cuestión. La ligazón entre geometría y física es muy fuerte, pero une física y dos geometrías. Qué geometría se quiera tomar, es algo que toca decidir. Habrá veces en que con una geometría se vea con más profundidad que con la otra.

Geometría no conmutativa

Desde la época de Descartes sabemos que es muy útil designar los puntos mediante coordenadas, ya sean la latitud y la longitud en la Tierra o, en el espacio tridimensional, las tres coordenadas cartesianas x, y y z. Y siempre se ha pensado que tales números son como los números ordinarios, cuya multiplicación no depende del orden de los factores: 3 por 5 es 5 por 3. Parece que vamos descubriendo que cuando se coordena el espacio a escalas muy pequeñas, los números necesarios no son como el 3 y el 5, sino tales que su producto dependerá del orden en que se multipliquen. Hay una nueva clase de números para los que sí cuenta el orden de la multiplicación.

O no es en realidad tan nueva. Hace mucho que conocemos las matrices. Su producto depende del orden de multiplicación. A por B no es igual a B por A si A y B son matrices. La teoría de cuerdas parece indicar que los puntos descritos por números corrientes deben sustituirse por objetos geométricos descritos por matrices. A escalas grandes, esas matrices se vuelven más y más diagonales (es decir, las únicas casillas no nulas son las de la diagonal). Las matrices diagonales conmutan en la multiplicación; no importa que se multiplique A por B o B por A si se trata de matrices diagonales. Pero, a medida que descendemos por la escala de distancias del microcosmos, los elementos no diagonales de las matrices se hacen más y más grandes hasta que, en las mayores honduras de lo pequeño, llegan a desempeñar un papel significativo.

La geometría no conmutativa es un campo nuevo que algunos han ido desarrollando durante años, sin pensar, en un principio, en su aplicación a la física. Euclides, Gauss, Riemann trabajaron en el contexto de la geometría conmutativa; ahora, Alain Connes y otros elaboran la geometría no conmutativa.

La sustitución de los puntos por matrices debe entenderse de la siguiente manera: no existe una verdadera noción de punto. Un punto es una aproximación. Si hay un punto, se debe representar con un número. Pero, a escalas suficientemente pequeñas, el lenguaje de puntos se convierte en una aproximación tan pobre que pierde validez. Cuando hablamos de puntos en geometría, hablamos en realidad de cómo algo se mueve a través de puntos. El movimiento de los objetos es lo que al final cuenta. Y resulta que es más complicado que un mero ir hacia atrás y hacia delante. Esa complejidad se expresa mediante una matriz. De manera que en vez de representar un objeto por el punto por el que está pasando, hay que representar su movimiento mediante la matriz de sus grados de libertad.

—*Brian Greene*

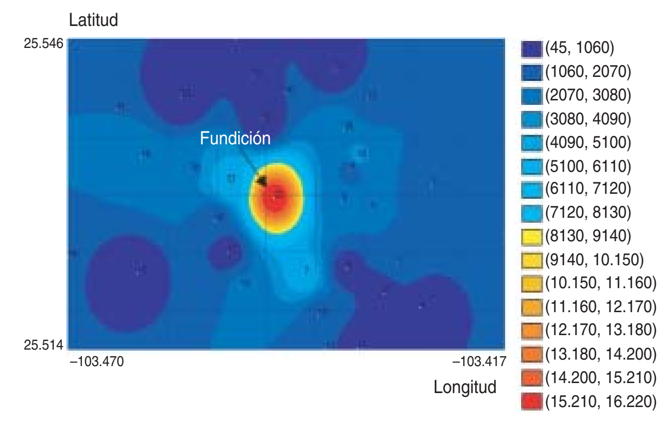
Contaminación

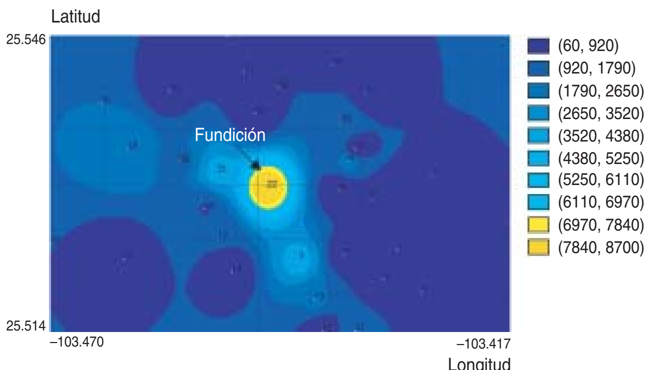
Detección de metales pesados

Los metales pesados se han convertido en motivo de preocupación tanto para el entorno como para la salud pública. En relación a esta última, causan daños tan severos y, en ocasiones, tan difíciles de detectar, que han obligado a las administraciones públicas a tomar medidas para reducir la exposición de la población, en particular la infantil.

A finales de 1998 se descubrieron numerosos casos de intoxicación por plomo en la población infantil de Torreón, ciudad del norte de México donde opera la cuarta mayor fundición de plomo del mundo: Met-Mex Peñoles S.A. Pese a la existencia de estudios anteriores que señalaban la gravedad del problema, hasta esa fecha las autoridades mexicanas y la empresa no acometieron las primeras medidas para reducir los niveles de exposición. Desde 1998, los estudios epidemiológicos han permitido detectar 15.000 niños con una concentración de plomo en sangre superior a los 10 microgramos por decilitro.

El plomo ambiental procede, casi exclusivamente, de la actividad humana. Entre las fuentes principales destacan la gasolina con plomo, la loza de barro vidriado que se emplea en la cocción de alimentos y,





Concentración de plomo expresada en partes por millón (ppm, equivalentes a miligramos por litro) detectada en 2000 (arriba) *y en 2002* (abajo) *en el suelo de Torreón. El punto central de la figura se encuentra a un lado de la fundición de plomo*

NOVA

por fin, las emisiones de industrias que producen o que consumen dicho metal. En el caso de Torreón, el plomo llega a la población a través de las emisiones atmosféricas de la fundición y a través del suelo, contaminado tras cien años de actividad de la empresa.

Met-Mex Peñoles ha tomado ya varias medidas para reducir las emisiones; del control de las mismas se encargan las autoridades ambientales mexicanas. También se trabaja en la descontaminación de suelos y en la remoción de polvos del área de Torreón.

La dimensión del problema y su difícil reconducción ponen de manifiesto la necesidad de controlar, durante los próximos años, la evolución de los niveles de plomo en los suelos que circundan la fundición. Este seguimiento ha de permitir verificar la eficacia de las medidas de reducción de emisiones, así como los resultados de las tareas de recuperación del medio. Los métodos analíticos de referencia para medir el plomo y otros metales y metaloides son la espectrometría por absorción atómica y la espectrometría por plasma inductivamente acoplada. Ambos requieren de instrumentos caros y de personal altamente especializado. Se requiere, pues, una importante inversión financiera.

El Instituto Tecnológico de La Laguna, ubicado en Torreón, y la Universidad Autónoma de Barcelona están colaborando en el desarrollo de sensores potenciométricos que puedan aplicarse a la vigilancia de terrenos contaminados, como los suelos urbanos de Torreón. Estos dispositivos, basados en la medición del potencial eléctrico, resultan más sencillos, económicos, fáciles de operar y, potencialmente, portátiles. Sirven para la medición rápida y barata de los niveles de contaminación, así como para el cribado previo de las muestras que permita optimizar el empleo de los sofisticados métodos analíticos de referencia.

Los sensores que estamos desarrollando constan de membranas poliméricas que se depositan sobre transductores potenciométricos de estado sólido. Estas membranas se activan con ionóforos, compuestos que reconocen selectivamente determinados iones, en este caso el plomo. La interacción entre el ionóforo y el ion metálico genera un potencial eléctrico, fácilmente mensurable, cuya magnitud se relaciona con la concentración del metal.

La presencia de ciertos metales (cadmio, arsénico y zinc) en las muestras de Torreón afecta negativamente la respuesta del sensor: podrían confundirse con el plomo. El cadmio, otro contaminante del entorno, constituye el interferente principal. Para solventar este problema, hemos desarrollado un analizador automatizado que integra una etapa de preconcentración selectiva: antes de acometer la medición con el sensor, se trata la muestra para aumentar su concentración de plomo. Con este pretratamiento se reducen las interferencias de otros metales; a la vez, se consigue mejorar el límite de detección del sensor. El nuevo analizador puede aplicarse a la determinación del contenido total de plomo en suelos y a la del plomo biodisponible. Este último es el asimilado por nuestro organismo; se trata, pues, del más peligroso desde el punto de vista de la salud pública.

El equipo desarrollado ha permitido evaluar el impacto de los proyectos que Met-Mex Peñoles S.A. ha emprendido para reducir la contaminación en Torreón. Los resultados obtenidos hasta el presente muestran que, durante el período comprendido entre 2000 y 2002, la concentración de plomo en los suelos que rodean la fundición se redujo aproximadamente a la mitad.

En la actualidad estamos explorando otra estrategia basada en el uso simultáneo de varios sensores activados con membranas que presentan selectividad cruzada. Simulan una “lengua electrónica”. Para hacerlos transportables, las membranas se depositarán sobre transductores miniaturizados. Estos equipos multisensor permitirán detectar simultáneamente la presencia de plomo y de otros metales tóxicos que contaminan el suelo y la atmósfera de Torreón.

FRANCISCO VALDÉS PEREZGASGA
Instituto Tecnológico de La Laguna, México
JULIÁN ALONSO CHAMARRO
Universidad Autónoma de Barcelona

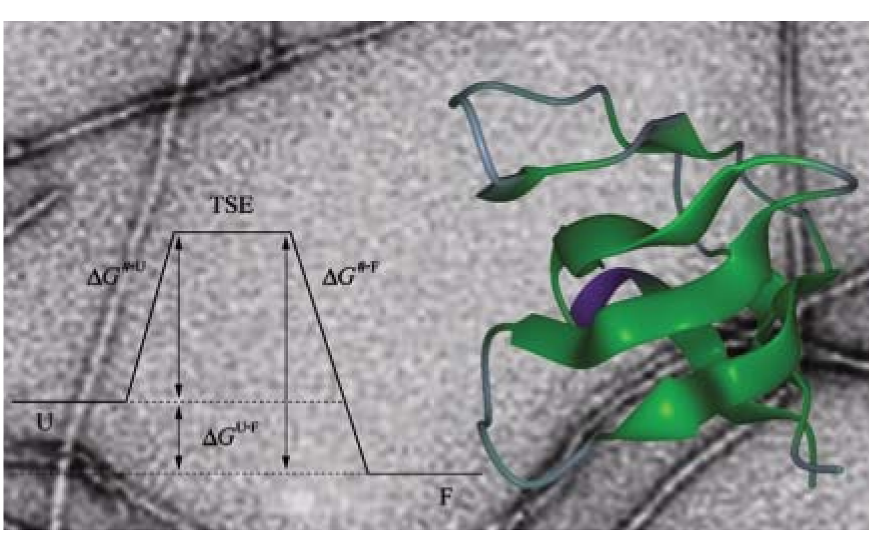
El plegamiento de las proteínas

El dominio SH3 como modelo

En 1972 Christian Anfinsen recibió el premio Nobel de química por su demostración de que las proteínas, sintetizadas inicialmente en cadenas extendidas, adoptaban de forma espontánea su conformación tridimensional nativa. La conclusión inmediata de los hallazgos de Anfinsen consistía en que la secuencia de aminoácidos de cada proteína (su estructura primaria) contenía toda la información necesaria para plegarla en su configuración funcional, una observación sorprendente si consideramos el vasto número de formas que pueden adoptar todos los residuos que constituyen una proteína. Estos trabajos pioneros han cristalizado en uno de los desafíos más fascinantes de la biología moderna: la comprensión de los fenómenos fisicoquímicos subyacentes bajo el plegamiento de las proteínas.

Existen varias teorías alternativas que tratan de explicar el plegamiento. Aunque cada una de ellas es diferente, coinciden en considerar el efecto hidrofóbico como uno de los factores principales. El efecto hidrofóbico, la tendencia de los grupos apolares a ser excluidos del medio acuoso, se fomenta con el aumento de entropía de las moléculas del solvente, que compensa la disminución de entropía —el aumento de orden— que acompaña al plegamiento de una proteína. Antes de abordar la vasta complejidad de los procesos de plegamiento, se ha empezado por ensayar con modelos experimentales sencillos. Uno de ellos, quizás el más exitoso de la última década, es el dominio SH3.

El dominio SH3 comprende proteínas de unos 60-85 aminoácidos. Tales proteínas carecen de actividad catalítica, puentes disulfuro, cofactores o modificaciones



Representación energética del modelo de plegamiento de dos estados (izquierda)*.* ***U*** (abreviatura del término inglés "unfolded") *designa la conformación inicial desplegada;* ***TSE*** ("transition State Ensemble")*, el estado de transición;* ***F*** (de "folded")*, el estado final plegado, y las distintas ΔG, las diferencias de energía libre asociadas a los distintos estados. A la derecha, una representación en lazo del dominio SH3. Fondo: fotografía de microscopía electrónica de fibras formadas por la agregación de SH3*

postraduccionales. Su simplicidad lo convierte en un modelo idóneo para el estudio del plegamiento.

Los dominios SH3 se caracterizan por poseer dos láminas β de 2-3 hebras cada una de ellas, que se empaquetan entre sí en una estructura muy compacta con un núcleo hidrofóbico central (*véase la figura*). El papel que desempeñan *in vivo* los dominios SH3 no es menos interesante. Presentes en multitud de proteínas, cumplen funciones relacionadas con la comunicación intercelular y la señalización intracelular. Así, los dominios SH3 se han asociado con la localización intracelular de proteínas, con varias formas de cáncer y con la activación de la fosfatidilinositol 3'-kinasa durante la respuesta inmunitaria. A diferencia de otras proteínas de mayor complejidad, los dominios SH3 no requieren proteínas accesorias para plegarse.

Las proteínas pequeñas, como los dominios SH3, se pliegan siguiendo la ruta más sencilla posible, o modelo de dos estados. De forma análoga a una reacción química donde los reactantes se transforman en productos tras superar una barrera de activación, la cadena extendida de una proteína (el estado inicial) debe superar una barrera de activación para alcanzar su conformación nativa (el estado final). El máximo de energía a lo largo de la coordenada de reacción define el estado de transición (ET), cuya conformación sólo puede ser inferida de un modo indirecto. El ET del dominio SH3 ha sido ampliamente estudiado por medio de la introducción de mutaciones puntuales en la secuencia de aminoácidos, lo que ocasiona cambios detectables en la estabilidad del ET y en la velocidad de plegamiento.

Con este simple método se ha podido construir un mapa de la contribución de cada residuo del dominio SH3 a su plegamiento. Gracias al mismo se ha determinado qué aminoácidos se pliegan en las fases iniciales del proceso para dar lugar a un núcleo de plegamiento y así facilitar que el resto de la secuencia establezca las interacciones necesarias para estabilizar la conformación final.

La combinación acertada de algoritmos computacionales y aproximaciones teóricas con técnicas biofísicas y de biología molecular ha permitido profundizar de manera espectacular en los procesos que dirigen el proceso de plegamiento.

Recientemente, se ha comprobado que dos dominios SH3 diferentes, el dominio SH3 de la proteína Src

Aminoácidos: Moléculas orgánicas quirales de pequeño tamaño (~100 dalton, ~10 átomos) dotadas de un esqueleto con dos grupos funcionales: un grupo amino y un grupo carboxílico, y de una cadena lateral que les confiere propiedades específicas. Son los bloques de construcción de las proteínas, que se sintetizan en los ribosomas por condensación de aminoácidos en una cadena lineal, sin ramificaciones. También reciben el nombre de residuos de aminoácidos o simplemente *residuos*.

Estructura primaria: Nivel más básico de la estructura de proteínas, consistente en la secuencia lineal de aminoácidos. A pesar de su simplicidad, la estructura primaria contiene toda la información necesaria para generar una estructura tridimensional.

Estructura secundaria: Segmentos de la cadena de una proteína que adquieren estructuras locales regulares, definidas por el patrón de puentes de hidrógeno formados entre residuos. Las estructuras secundarias más características son las hélices α, las hojas β y los giros.

Estructura terciaria: Organización tridimensional que adopta la cadena (elementos de estructura secundaria y zonas menos regulares o lazos) en condiciones fisiológicas. Se caracteriza por un núcleo hidrofóbico o apolar y una superficie expuesta al medio acuoso, donde normalmente predominan los residuos polares.

Estructura cuaternaria: Asociaciones de varias proteínas en complejos multiproteicos. Los complejos pueden estar compuestos por un único tipo de proteína o por varios tipos de ellas. Un ejemplo de estructura cuaternaria son las histonas, que se asocian en grupos de ocho proteínas en el nucleosoma.

Dominio: Un dominio es una proteína o parte de una proteína que suele plegarse de forma independiente y, normalmente, pueden cumplir una función concreta. Muchas proteínas contienen más de un dominio. Por ejemplo, la proteína Src (una kinasa de tirosina) contiene cuatro dominios, designados respectivamente por SH1, SH2, SH3 y SH4.

(kinasa de tirosina) y el dominio SH3 de α-espectrina, comparten la misma ruta de plegamiento, aun cuando sus secuencias difieren en más del 70 % de sus aminoácidos. Este descubrimiento ha permitido establecer que, al menos para proteínas sencillas, la topología de la conformación nativa ejerce, en la elección de la ruta de plegamiento, una influencia superior a los detalles de la secuencia.

Asimismo, se ha comprobado que las proteínas con topologías sencillas, donde la mayoría de las interacciones se desarrollan entre aminoácidos próximos en la secuencia, se pliegan con mayor rapidez que las proteínas con topologías complejas.

A pesar de las pruebas sólidas que respaldan el papel principal de la topología en la ruta de plegamiento, la estructura primaria podría desempeñar un papel importante modulando cuántas y qué tipo de interacciones se establecen en el ET y, por tanto, definiendo, junto a la topología, los detalles del proceso de plegamiento. Las últimas tendencias apuntan en la dirección de averiguar qué papel cumplen las interacciones no nativas en el estado de transición (es decir, las interacciones que no operan en la conformación nativa, aunque sí intervienen en el ET).

En los últimos volúmenes del grupo de revistas *Nature* se ha hecho una extensa revisión de las enfermedades que recientemente se han denominado enfermedades del plegamiento, como el Alzheimer, el Parkinson y la enfermedad de las vacas locas. A pesar de que aún se investiga para concretar las causas de este tipo de patologías, ha quedado corroborada su asociación con el incorrecto plegamiento de ciertas proteínas. Por ejemplo, la formación de fibras amiloideas en muchas enfermedades neurodegenerativas, que se acumulan en forma de placas o depósitos sólidos, podría atribuirse a la agregación de proteínas mal plegadas, pudiéndose considerar al estado de transición como precursor potencial de los agregados.

Actualmente, los cuatro grupos principales de investigación que trabajan con el dominio SH3 como modelo de estudio del plegamiento son los de Luis Serrano, en el Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg, Chris Dobson, en la Universidad de Cambridge, Alan Davidson, en la Universidad de Toronto, y David Baker, en el Instituto Howard Hughes de Investigaciones Médicas de Washington.

En los dos últimos años, los grupos de Serrano y Baker han elaborado algoritmos para la predicción de la ruta de plegamiento con indudable éxito y, además, Dobson y Serrano han conseguido perturbar el correcto plegamiento de diferentes dominios SH3 desencadenando la formación de fibras. Esta primera prueba experimental del estado de transición como precursor de agregados proteicos contiene la promesa de nuevos avances en el control de las enfermedades de plegamiento.

M. CRISTINA VEGA
Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL)
Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)
Hamburgo

El margen norte de Gondwana

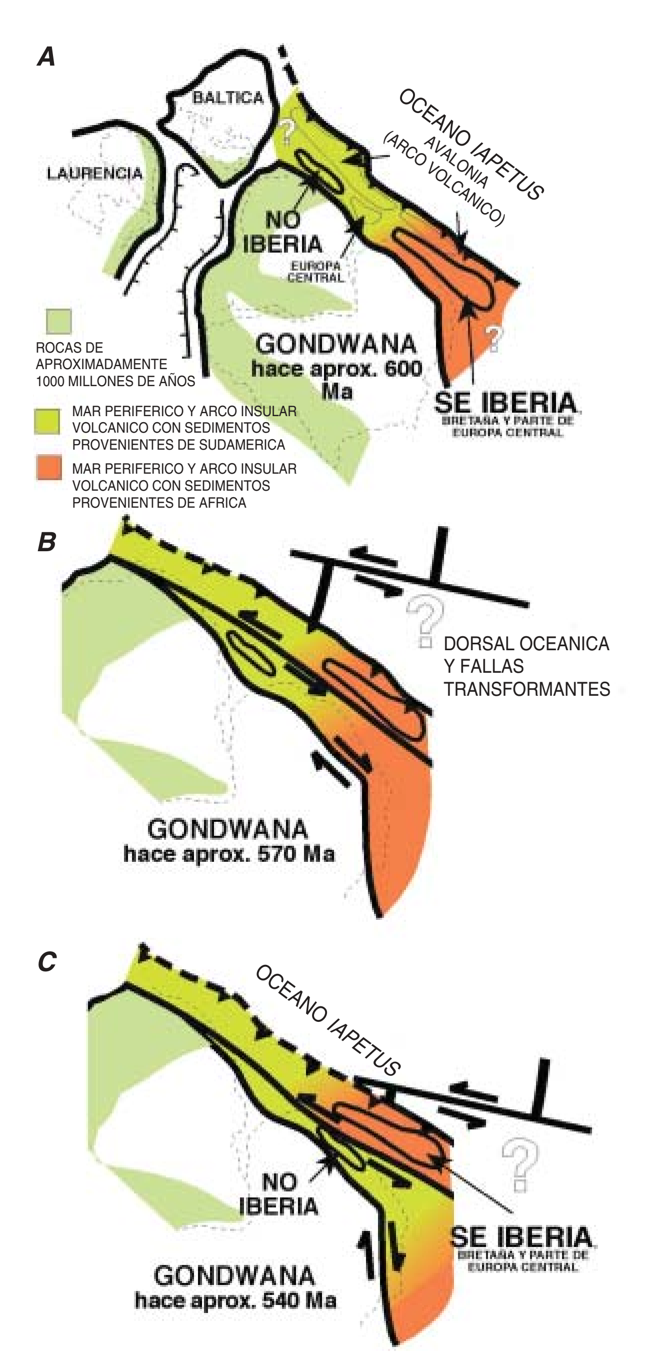
Reconstrucción de un margen continental de hace 600 millones de años

La reconstrucción de la distribución geográfica de continentes y océanos a lo largo de la historia geológica de nuestro planeta es una tarea que consume una buena parte del tiempo y los recursos de un gran número de investigadores dedicados a las ciencias de la Tierra en todo el mundo. Esta tarea se hace más ardua y compleja a medida que retrocedemos en el tiempo geológico, sobre todo con anterioridad al Jurásico, ya que no existen restos de corteza oceánica pre-Jurásica que hayan preservado por medio de las anomalías magnéticas los avatares de las distintas placas litosféricas que componen, o han compuesto, nuestro planeta.

Uno de los grandes continentes objeto de mayor discusión es Gondwana, mencionado por primera vez en 1885 por el geólogo austríaco E. Suess. Toma su nombre de la región de la India en que fue identificado. Este supercontinente, de cuya existencia hay pruebas que se remontan a hace más de 650 millones de años, integraba, hasta su desmembramiento a lo largo de la Era Cenozoica, partes de las actuales Africa, Sudamérica, Antártida, Australia e India, y una porción considerable de Europa meridional, incluida la península Ibérica. Este continente formó parte de la última Pangea (la amalgamación de todos los continentes) tras colisionar con Laurasia hacia el final de la Era Paleozoica (en el período Carbonífero), hace unos 300 millones de años.

La reconstrucción de Gondwana con anterioridad a la Era Paleozoica presenta muchas más complicaciones e incertidumbres, aunque está bien documentado que durante el Proterozoico terminal (entre 650 y 540 millones de años) sufrió un cambio importante con la reorganización de su margen septentrional, en lo que se conoce como la orogenia Panafricana-Cadomiense-Avaloniense.

Durante esa época, Gondwana tenía una localización aproximadamente centrada en el polo sur y la rodeaba el océano *Iapetus*. Todas sus costas miraban hacia el norte: lo que se conoce ahora como margen norte de Gondwana es el sector que comprendía el norte de los actuales continentes sudamericano y africano y parte de Europa meridional. Ese margen tenía una geografía muy distinta de la que vemos hoy en día. En aquella ordenación continental Africa y Sudamérica se encontraban unidas y su costa septentrional se parecía al que presenta actualmente el margen oriental de Asia, donde existen un mar periférico, el mar del Japón, y un arco insular volcánico (Corea, Japón, Taiwán) causado por una zona de subducción en la que la corteza oceánica del Pacífico es consumida debajo de Asia. De manera similar, a grandes rasgos, el margen norte de Gondwana encaraba un mar periférico que recibía sedimentos de Gondwana y del arco insular volcánico conocido como Avalonia, que lo separaba del océano *Iapetus*. Los



Representación esquemática y tentativa de la paleogeografía del margen norte de Gondwana en el Proterozoico superior. Se aprecia la migración de los terrenos que constituían el NO de Iberia desde posiciones perisudamericanas, donde existen rocas de edad Grenville (1000 millones de años), a posiciones periafricanas, tal y como se puede interpretar a partir de los datos de circones detríticos presentes en las rocas sedimentarias neoproterozoicas estudiadas. Las formas de los continentes actuales sólo se representan por mor de comparación

restos de ese mar periférico (al que se le puede denominar proto-Reico) se encuentran dispersos por Iberia, Bretaña y Europa Central, mientras que los restos de Avalonia se reconocen en algunos sectores de las islas Británicas y del margen atlántico de Norteamérica (provincias marítimas de Canadá y NE de Estados Unidos).

La dificultad de establecer la posición hace aproximadamente 600 millones de años de los distintos fragmentos que integran este rompecabezas hace necesaria la utilización de herramientas que permitan establecer relaciones de proximidad o parentesco entre las distintas piezas. La más usada actualmente es el estudio de áreas fuente de los sedimentos mediante técnicas de datación geocronológica de determinados minerales, especialmente el circón (silicato de circonio), un mineral del cual es hasta cierto punto fácil conocer la edad y que actúa como una "huella dactilar" del área de donde provengan los sedimentos. Mediante la datación de los circones se pueden, por tanto, establecer relaciones de proximidad o parentesco entre los sedimentos de una región determinada y el lugar de donde provienen.

La datación de los circones se realiza mediante el sistema isotópico uranio-plomo (U-Pb). Tres hechos fundamentales convierten al circón en el mineral "estrella" de la datación U-Pb: i) su presencia en la mayor parte de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias detríticas; ii) la incorporación de uranio en su red cristalográfica durante su formación; iii) la incorporación de cantidades mínimas de plomo durante su cristalización. Debido a estas dos últimas características, la inmensa mayoría del plomo que se encuentra en el circón es radiogénico, es decir, procede de la desintegración radiactiva del uranio. Aunque la complejidad analítica real es considerable, cabe describir de forma sencilla la datación U-Pb: con diversas técnicas espectrométricas se miden las proporciones de los diferentes isótopos de plomo y uranio en el mineral analizado y la edad (el tiempo transcurrido desde la formación del mineral) se calcula mediante las ecuaciones que relacionan las proporciones de los isótopos "padre" e "hijo" ($^{238}U/^{206}Pb$, $^{235}U/^{207}Pb$) con las constantes de desintegración. Una gran ventaja del método de datación U-Pb es que, dada la vida media de los isótopos radiogénicos involucrados, se puede aplicarlo a minerales con edades comprendidas entre unos pocos millones de años y aproximadamente 4500 millones de años (la edad de la Tierra).

Una vez obtenidos los datos de las edades de circones de rocas sedimentarias del Proterozoico terminal y Paleozoico inferior en el NO de Iberia, el SO de Iberia y Bretaña, nos encontramos con que las relaciones de parentesco del NO de Iberia no son las mismas que las que exhiben las otras dos áreas analizadas, ya que posee abundantes circones de una edad aproximada de 1000 millones de años, cuya presencia puede explicarse si el NO de Iberia se encontró hace 600 millones de años cerca de la parte de Gondwana que se corresponde en la actualidad con el continente sudamericano y algunas partes del actual México. De la misma manera se puede establecer que tanto el SO de Iberia como parte de Bretaña se encontraban en una posición distinta, ya que los sedimentos que recibían no tienen el mismo origen, siendo

más probable, de acuerdo con las edades de los circones presentes en ellos, que provengan de lo que en la actualidad es el NO de Africa.

La aproximación de estos y otros terrenos situados a lo largo del margen norte de Gondwana tuvo lugar aproximadamente en el límite Precámbrico-Paleozoico (hace unos 540 millones de años), migrando desde posiciones perisudamericanas a posiciones periafricanas a lo largo de grandes fallas similares a la falla de San Andrés, situada en el margen oeste norteamericano (*véase la figura*). A partir de entonces, estas áreas comparten una evolución común aunque no por ello simple, ya que los avatares geológicos sufridos por Iberia y sus aledaños desde entonces representan una historia compleja, difícil e intrincada que está siendo poco a poco desentrañada por un sinnúmero de apasionados científicos dedicados a las ciencias de la Tierra.

GABRIEL GUTIÉRREZ ALONSO
Universidad de Salamanca

JAVIER FERNÁNDEZ SUÁREZ
Universidad Complutense de Madrid

TERESA E. JEFFRIES
Museo de Historia Natural de Londres

Diversificación de los anticuerpos

Inicio

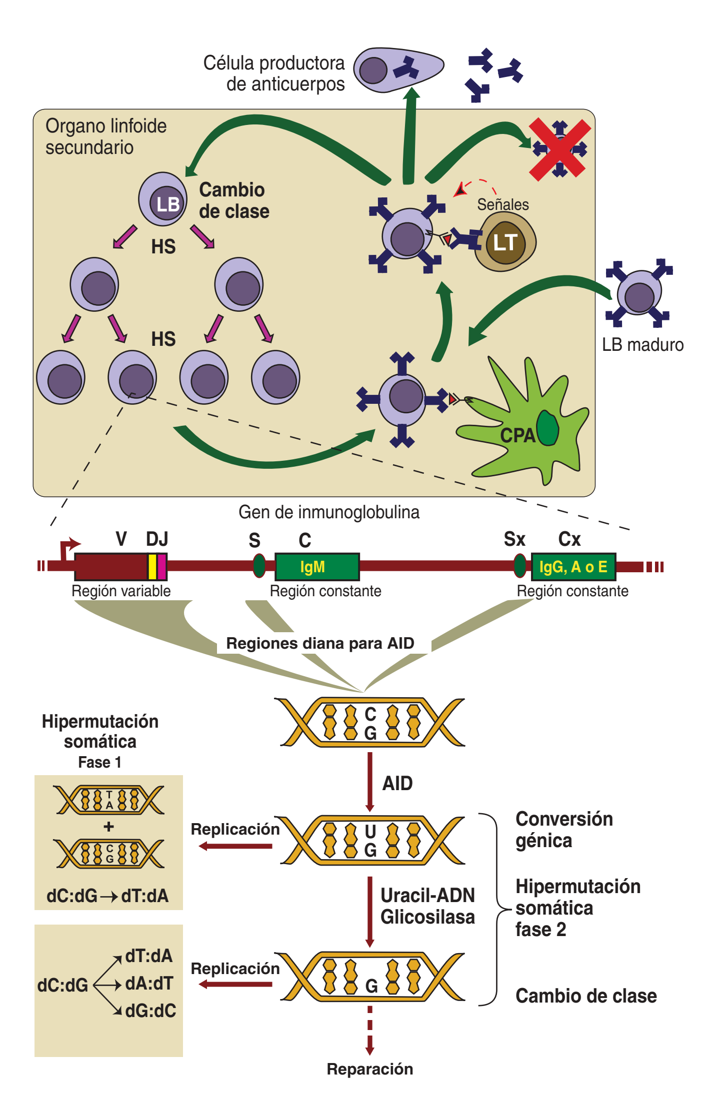
El repertorio de anticuerpos o inmunoglobulinas producido por el sistema inmunitario posee la capacidad de reconocer selectivamente una variedad casi infinita de antígenos. Tal eficacia depende de dos mecanismos moleculares que modifican los genes de las inmunoglobulinas; ocurre el primero durante el proceso de diferenciación de los linfocitos B (LB) en la médula ósea y, el segundo, en los LB maduros de los órganos linfoides como bazo y ganglios.

Durante el proceso de diferenciación de los linfocitos B, los genes de inmunoglobulinas se reorganizan mediante corte y empalme para constituir una unidad funcional. La unión combinatoria de fragmentos V, D y J, que conforman la región variable, determina la especificidad de las inmunoglobulinas (Ig) de cada linfocito B. Así se origina el repertorio primario de anticuerpos. Antes de ser secretadas, las inmunoglobulinas se expresan en la membrana de los LB. Allí funcionan como receptores; cuando el LB maduro migra a los órganos linfoides secundarios, tales receptores le permiten reconocer algún antígeno foráneo con baja afinidad.

La primera vez que esto ocurre, se activa el linfocito B y se estimula su proliferación. Se inicia entonces el segundo programa de modificación, la hipermutación somática (HS), que permitirá mejorar la especificidad y fuerza con que el anticuerpo reconoce a su antígeno, gracias a lo cual resulta más eficiente su eliminación. Al propio tiempo, ocurre otra alteración génica: el cambio de clase, que modifica la región constante de la cadena pesada de Ig al reemplazar el isotipo IgM por IgG, IgE o IgA; tal modificación otorga diferentes propiedades biológicas al anticuerpo.

La HS implica la acumulación sucesiva de mutaciones en las regiones variables de la Ig con una frecuencia muy superior a la tasa de mutación espontánea. Las variantes generadas se evalúan mediante interacciones con células presentadoras de antígenos (CPA) y linfocitos T (LT). Los linfocitos B con mutaciones que reducen la afinidad de la Ig por el antígeno ven afectada esa interacción y proliferan menos o son inducidos a una muerte celular programada. Por el contrario, los que heredan mutaciones que mejoran dicho reconocimiento terminan por predominar en la población. Como se ilustra en el panel superior de la figura, éste es un proceso iterativo de mutación y selección; en razón del mismo, madura la afinidad de la respuesta de anticuerpos hacia cada antígeno.

En muchas especies, hombre incluido, la hipermutación somática es la combinación de dos componen-



tes. En una primera, o fase 1, en la cual las mutaciones se producen en los nucleósidos dG (desoxiguanosina) y dC (desoxicitidina). En una segunda etapa, o fase 2, que depende de la primera, las mutaciones acontecen en dA (desoxiadenosina) y dT (desoxitimidina).

Las aves y algunas especies de mamíferos presentan una forma alternativa de generación de diversidad. Se trata de la conversión génica. En este caso, la secuencia de la región variable funcional se altera mediante la copia de fragmentos similares, aunque no idénticos, que hay en otras regiones variables carentes de función.

Los tres procesos mencionados (HS, conversión génica y cambio de clase) dependen de una misma enzima, la citidina desaminasa (AID), que se expresa sólo en linfocitos B activados. Esta enzima se halla filogenéticamente emparentada con otras que actúan sobre ciertos ARN mensajeros y catalizan la eliminación de un grupo amino de determinadas citidinas (en vez de dC), lo que las transforma en uridinas (U).

No obstante esta semejanza evolutiva, el sustrato de AID es el ADN como se ha demostrado bioquímica y funcionalmente. Su expresión en la bacteria *Escherichia coli* produce mutaciones en el genoma, específicamente en dC, que se evidencian por un aumento en la aparición de variantes resistentes a diferentes selecciones: una prueba habitual para comprobar la mutagenicidad de compuestos químicos.

A partir de diversos trabajos se ha llegado a la conclusión de que la enzima AID desencadena la hipermutación somática, la conversión génica y el cambio de clase en los genes de inmunoglobulina. Produce ese efecto al desaminar el nucleósido desoxicitidina en diferentes regiones del gen (*véase la figura*). La desaminación de dC resulta en la formación de dU, dando lugar a un par dU:dG en la doble hebra de ADN. Esta reacción ocurre también de forma espontánea en condiciones fisiológicas; por lo cual las células poseen una vía para eliminarlo, dada su capacidad mutagénica.

La enzima uracilo-ADN-glicosilasa (UDG) comienza su reparación al romper la unión entre el uracilo y la desoxirribosa del nucleótido; crea en el ADN un sitio donde no existe una base nitrogenada, un sitio abásico. De la escisión del mismo se ocupa una endonucleasa; tras lo cual una ADN polimerasa vuelve a introducir la base correcta. Ahora bien, si esto ocurre en el caso de la Ig no se genera mutación, ni ocurre, por tanto, el proceso de hipermutación somática. Se trata, empero, de una vía que, por razones desconocidas, no se completa en este caso particular.

Por el contrario, la lesión en forma de dU o sitio abásico persiste y funciona como molde para la síntesis de ADN. El nucleósido dU, por su estructura similar a dT, se empareja con dA; con ello provoca mutaciones de dC:dG a dT:dA. Pero si se utiliza el sitio abásico como molde, ciertas ADN polimerasas especializadas pueden introducir cualquier base para sortear la lesión y originar mutaciones de dC:dG a dA:dT, dT:dA o dG:dC, que es lo que normalmente ocurre en la hipermutación somática. En efecto, al inhibir la actividad de UDG en una línea celular de linfocitos B, el 90 % de las mutaciones en desoxicitidina y desoxiguanosina resultan en dT y dA, respectivamente, cuando representan, en condiciones normales, un 40 %.

El mismo efecto sobre las mutaciones en dC:dG se observa en ratones deficientes en la enzima UDG. La fase 1 de hipermutación somática ocurre debido a la síntesis de ADN a través de un sitio abásico generado por la acción sucesiva de AID y UDG (*véase la figura*). Sumado a esto, el cambio de clase cae drásticamente en los ratones sin UDG, de lo que se infiere que el sitio abásico constituye un intermediario necesario en este proceso. AID y UDG actúan aquí sobre dC, presente en las regiones del gen de inmunoglobulina que participan en el cambio de clase (*Sμ y Sx en la figura*).

Queda todavía por esclarecer cómo se canaliza una misma lesión primaria (el dU) hacia diferentes destinos y cuáles son las moléculas responsables, según la región del gen y la especie. A diferencia de las mutaciones en dC:dG, las mutaciones en dA:dT no son afectadas por la ausencia de UDG; de lo que se desprende que habría un mecanismo diferente para la fase 2 de hipermutación somática. Si hay conversión génica, entonces la acción de AID desencadena un mecanismo de recombinación homóloga. La misma acción de AID permite el cambio de clase que implica cortes y empalmes entre regiones S, que no son homólogas.

Otra cuestión abierta concierne a la actuación específica de AID en sus regiones diana. La introducción de mutaciones en otros genes puede acarrear consecuencias letales para la célula o favorecer transformaciones cancerosas.

No obstante, aun cuando los tres mecanismos difieren en su resolución, la desaminación de desoxicitidina en dU por parte de AID constituye el origen e intermediario común, conservado durante la evolución, de los mecanismos de hipermutación somática, conversión génica y cambio de clase involucrados en la generación de diversidad y funcionalidad de los anticuerpos.

JAVIER M. DI NOIA
MRC Laboratorio de Biología Molecular,
Cambridge (U.K.)

El cobre y la ría de Pontevedra

Aporte y contaminación

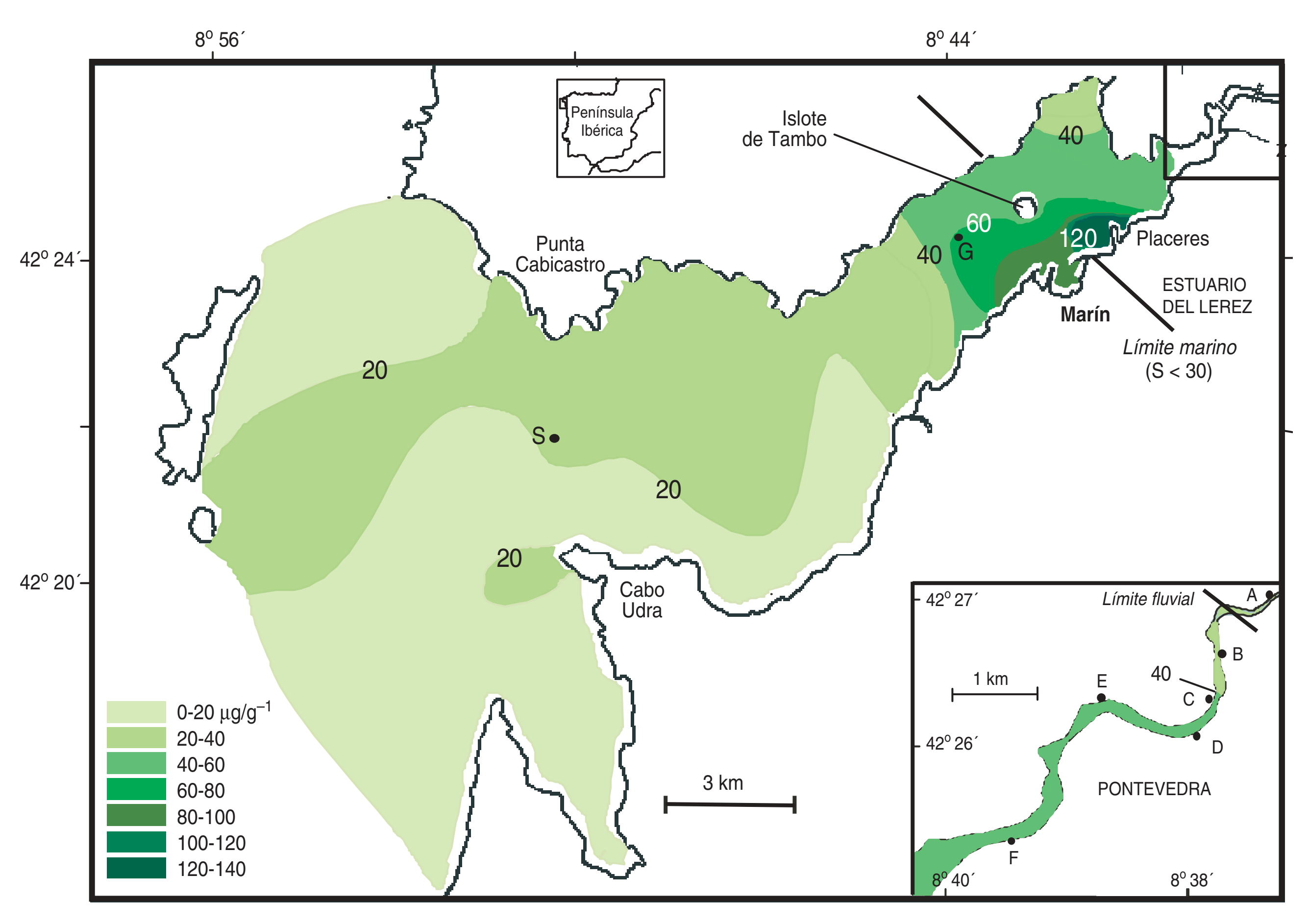
La ría de Pontevedra, al igual que sus tres vecinas Rías Bajas gallegas, forma parte de un área costera muy productiva debido al afloramiento marino que suele tener lugar todos los años entre mayo y septiembre. Durante los episodios de afloramiento penetra sobre la plataforma gallega un agua subsuperficial fresca (11-13 ºC), rica en nutrientes que fertilizan las rías y son la razón inicial de su elevada riqueza en

vida. La llegada o carencia de nitrato, fosfato y silicato limitará la producción primaria dentro de la ría, ya que el agua que aflora no lo hace de una manera continua. La otra fuente posible para esas sales nutrientes, el río Lérez, contribuye en muy poca cantidad por estar entonces en su época seca, de bajo caudal. Sin embargo, las microalgas marinas también necesitan de otros elementos químicos que actúan como micronutrientes, si bien nunca, por lo normal, limitan su crecimiento, pues no llegan a agotarse, al contrario de lo que ocurre con macronutrientes como el nitrato. Uno de esos micronutrientes es el cobre, al cual se le considera en el medio marino un elemento traza: su presencia es inferior a 50 nM (nanomoles por litro). En los océanos su contenido disuelto oscila entre 0,5 y 6 nM (4 nM de media, 0,25 mg/m^3). Al utilizarlo el fitoplancton, su distribución es la propia de un nutriente: disminuye su concentración en la capa fótica, donde hay luz y ocurre la fotosíntesis, y aumenta en la capa afótica, donde prima la remineralización y en la que retorna al agua tras descomponerse la materia orgánica particulada.

La actividad antropogénica ha conducido a una contaminación por metales pesados, entre ellos el cobre, de numerosos sistemas marinos, donde sus concentraciones se han incrementado con respecto a las consideradas naturales o prístinas. El cobre llega al medio ambiente, entre otras vías, por sus aplicaciones eléctricas, por las tuberías y las aleaciones (el latón, por ejemplo), y en compuestos que se emplean como alguicidas y molusquicidas en la pintura del casco de los barcos. Esta última es una de las fuentes más importantes de contaminación por metales en las aguas próximas a los puertos.

El cobre disuelto hacia la ría de Pontevedra llega por la superficie con los diferentes cursos de agua fluvial y los vertidos desde el litoral, y bajo ella con el caudal del agua marina que penetra desde el océano. Durante un proyecto científico llevado a cabo en la ría de Pontevedra se tomaron quincenalmente, durante el año 1998, muestras en seis puntos, donde se cuantificaron sus aportes de agua a la ría y se analizaron sus contenidos en cobre disuelto. Dichos puntos correspondieron al río Lérez (*A en la figura*), a un aliviadero de un canal de agua tomado del Lérez (*B*), al agua vertida desde la Junquera del Lérez (*C*), a un desagüe pluvio-residual (*D*), al regato Granda (*E*), al regato Gafos (*F*) y al vertido desde el emisario submarino de aguas residuales, ya sometidas a tratamiento primario, de la ciudad de Pontevedra (*G*).

Los datos obtenidos (*véase la tabla*) indican que el río Lérez es de aguas prístinas en cuanto a este metal, de acuerdo con los niveles de cobre mundiales para aguas continentales no contaminadas, cuya con-



Mapa de la concentración de cobre en el sedimento superficial de la ría de Pontevedra. Cortesía de Elsevier Science Ltd. (2003)

ORIGEN	A: Lérez	B: aliviadero	C: Junquera	D: alcantarilla	E: Granda	F: Gafos	G: emisario
[Cu] (nM)	1-11	5-15	8-40	20-170	12-30	14-90	120-570
F (kgCu/año)	200	9	2	6	32	73	190

Rango de concentraciones de cobre y su flujo medio anual en los caudales de agua que alcanzan el estuario del Lérez en la ría de Pontevedra

centración oscila entre 2 y 35 nM. Esa misma consideración merece el agua marina que penetra en la ría; en la estación *S* (*véase la figura*), su contenido en cobre fue de 6-7 nM. No obstante, el agua saliente analizada poseía concentraciones mayores, entre 8 y 10 nM Cu, sin duda influida por una mayor presencia de metal disuelto en la zona interna de la ría y especialmente en los alrededores de Marín-Placeres. Respecto al fitoplancton, el cobre tiene un comportamiento dual: es esencial para la vida en los procesos metabólicos de la biosíntesis de algunas proteínas y enzimas, pero su exceso en el medio natural resulta tóxico. Compite por los sitios activos de otros metales esenciales y su fuerte tendencia a formar complejos con proteínas y ácidos nucleicos origina complejos no funcionales con esas macromoléculas. Los niveles peligrosos varían según la especie, pero un valor de referencia para aguas marinas puede ser de 150 nM, que en el estado de California se considera de toxicidad crónica. Más exigentes son las normativas de estándares de calidad medioambiental en ciertos países europeos, que señalan que el cobre disuelto en el medio no debe sobrepasar los 75 nM. A pesar de ello, su peligrosidad en el medio acuático está más influida por la especiación del cobre (la formación de diferentes especies químicas del cobre) y la presencia de otros contaminantes, que por su concentración disuelta total.

Un papel fundamental en la limpieza y regeneración de una zona afectada lo constituye el tiempo de renovación del agua. En esa parte interna de la ría, hasta Punta Loira, varía entre un día y una semana, dependiendo del caudal fluvial, de la intensidad del afloramiento y de los vientos, que empiezan a tener importancia cuando exceden de los 15 km/h.

El exceso de cobre disuelto no sólo se exporta al océano. En un estuario como el del Lérez, la mezcla agua dulce-salada tiene lugar entre los extremos que, durante un ciclo anual normal de lluvias, determina espacialmente el intervalo de salinidad 0-30 —el 0 corresponde al límite fluvial, el 30 al marino— (*véase la figura*). Los cambios de fuerza iónica y de *p*H en la mezcla, o la captación por el fitoplancton, retiran cobre disuelto, que acaba sedimentando. A lo largo de los años, el compartimento sedimentario es testigo de lo que va ocurriendo en la columna de agua; en él es donde podemos buscar la memoria de esos procesos biogeoquímicos.

A fin de determinar la contaminación de un sedimento, se suele trabajar con la fracción cuyas partículas tienen un diámetro inferior a 63 µm, que es el límite entre fangos y arenas, y considerar un valor natural de cobre en ella, fuera de la influencia antropogénica, que se ha establecido en 20 µgCu g^{-1} (o partes por millón de gramo de cobre) para la ría de Pontevedra. El número de veces que se exceda este valor se denomina "factor de enriquecimiento" (EF). Observando el mapa en la figura se comprueba que la parte medio-externa de la ría, al igual que la estuárica próxima al límite fluvial del Lérez, presenta unos niveles de cobre que son de 1 a 2 veces el valor natural, lo que no se suele considerar como contaminación. Por el contrario, en la zona frente a Placeres-Marín existe un enriquecimiento de 3 a 6 veces el natural, es decir, existe una contaminación cierta por cobre. Esta contaminación de la parte interna de la ría es moderada (EF de 2 a 3) desde el islote de Tambo a la orilla norte, pero alta en la orilla sur (EF de hasta 7). Los valores encontrados en esa zona superan los 40 µgCu g^{-1}, el límite inferior guía, reseñado por algunos autores, a partir del cual se pueden producir efectos biológicos adversos.

Una correcta opinión sobre la importancia de las diferentes fuentes de este metal ha de considerar, además de la concentración, sus flujos. El principal proviene del río Lérez, de aguas prístinas, y es semejante al causado por las aguas residuales vertidas a través del emisario submarino (*G en la figura*). Por desgracia, existen una serie de contribuciones difusas de cobre difícilmente cuantificables. Provienen de la zona portuaria y astilleros de Marín y del desagüe discontinuo de una factoría industrial en Placeres, cuya concentración en cobre disuelto, ocasionalmente medida, osciló entre 80 y 650 nM. Una estimación de dichas contribuciones se puede realizar mediante un balance del cobre disuelto que la ría intercambia con el océano. Con esta aproximación, resulta que ese aporte difuso sería unas tres veces superior a la suma de las demás contribuciones (*A-G*); ha de considerarse como el principal flujo de cobre hacia la ría. Sería una explicación probable de la contaminación del sedimento en el transecto Marín-Placeres; provendría principalmente de las pinturas de los barcos y una sedimentación de cobre tras el brusco cambio de salinidad que sufre el vertido industrial.

RICARDO PREGO
y ANTONIO COBELO GARCÍA
Grupo de Biogeoquímica Marina,
Departamento de Oceanografía,
Instituto de Investigaciones Marinas
(IIM-CSIC) Vigo

Begoña Vendrell, Ricardo Guerrero y Mercedes Berlanga

Ecosistemas mínimos



1. Paisaje de tapices microbianos, en las proximidades de las Salines du Giraud, en la Camarga francesa. En el detalle se aprecia la apariencia de tierra embarrada y agrietada de los tapices.

M. BERLANGA Y R. GUERRERO

Mirando las extensas áreas agrietadas y desiertas que ocupan buena parte de las tierras deltaicas y pantanosas —recordemos la Camarga francesa o el delta del Ebro —, resulta difícil imaginar que esas zonas, rotas y resquebrajadas, alberguen un sinfín de organismos.

Lo que a primera vista parece tierra estéril, se convierte, al observarse con mayor finura, en un mar de tapices microbianos donde habita una gran diversidad de organismos, pese a las habituales condiciones extremas (ambientes bastante salinos). Estas formaciones multilaminares de comunidades mayoritariamente procarióticas quizá sean los coetáneos de los primeros ecosistemas terrestres, representados por los estromatolitos fósiles. Estos tapices se formaron a partir de la fosilización de la acumulación de capas de organismos muertos, unidos por una matriz de carbonato cálcico. Los tapices estromatolíticos más antiguos tienen una antigüedad de 3500 millones de años.

En los tapices microbianos, las comunidades de microorganismos se disponen unas bajo otras, en función del entorno más adecuado para su metabolismo; con toda nitidez, y en los escasos centímetros de un tapiz, se aprecian unos gradientes químicos definidos (sobre todo, la presencia de oxígeno, que disminuye con la profundidad, y de sulfuro de hidrógeno, que aumenta) y físicos (en particular, la disponibilidad de luz, que se extingue a medida que aumenta la profundidad del tapiz).

La importancia de estos especiales ecosistemas radica en las posibilidades que ofrecen para el estudio de la tierra primigenia y de la ecopoyesis, o formación de los primeros ecosistemas.



2. Sección transversal de un tapiz microbiano. Pueden apreciarse las finas capas de comunidades de organismos de diferente metabolismo. Se distinguen a simple vista por ligeros tonos de color: verdoso (cianobacterias), rojo (RSB), verde (GSB) y negro (SRB). De este modo, en las capas superficiales se encuentran las aerobias cianobacterias, tales como Lyngbya *o* Microcoleus, *a menudo acompañadas por algunas algas diatomeas, que aprovechan la luz para realizar la fotosíntesis oxigénica. Bajo éstas se encuentra otro tipo de bacterias que necesitan luz, si bien no les resulta adecuado un ambiente bien oxigenado: son las bacterias rojas y verdes del azufre (PSB como las cromatiáceas y GSB como las clorobiáceas, respectivamente); realizan fotosíntesis anoxigénica, usando sulfuro de hidrógeno como donador de electrones. Subyacen a estas capas de bacterias, en la zona donde la luz no llega, comunidades formadas por bacterias sulfatorreductoras, respiradoras de sulfatos, cuyo metabolismo desprende buena parte del sulfuro de hidrógeno que emplearán las bacterias de capas superiores. Es ésta una zona anóxica; al levantar la costra superior de los tapices, contemplamos una zona densa y negruzca, que desprende olor a sulfuro de hidrógeno. Por fin, en el sustrato inferior, hallamos capas de bacterias muertas, que se han ido acumulando con el tiempo y que fueron un día la parte viva del tapiz*

3. Fotografía de un estromatolito de Utica, Nueva York, EE.UU., con una antigüedad de unos 500 millones de años. Los estromatolitos son unas estructuras sedimentarias multilaminares formadas por la calcificación de tapices microbianos



4. Dentro del grupo de las espiroquetas, y en los tapices del delta del Ebro, Ricardo Guerrero y Lynn Margulis descubrieron en 1993 la mayor espiroqueta de vida libre hasta ahora conocida: Spirosymplokos deltaeiberi, *que puede medir hasta 100 μm × 0,3-0,4 μm*

R. GUERRERO (*arriba y abajo*);
M. BERLANGA Y R. GUERRERO (*centro*)

El remolcador de asteroides

Un remolcador espacial equipado con motores de plasma podría evitar el choque de un asteroide contra la Tierra empujándolo durante largo tiempo

Russell L. Schweickart, Edward T. Lu, Piet Hut y Clark R. Chapman

Una noche cualquiera, más de 100 millones de residuos interplanetarios entran en la atmósfera terrestre. Por suerte, la mayoría de estos pedazos de asteroides y cometas son como pequeños guijarros. El peso total de esta lluvia no pasa de unas toneladas; la atmósfera de nuestro planeta tiene densidad suficiente para volatilizar casi todos los fragmentos. Los desechos surcan los cielos sin producir daño alguno, dejando tras de sí los trazos brillantes que llamamos estrellas fugaces.

Pero cuando un objeto mayor choca contra la atmósfera, no se vaporiza; estalla. En enero de 2000, una roca de dos a tres metros de diámetro explotó sobre el Territorio del Yukon, en Canadá, con una fuerza equivalente a cuatro o cinco kilotones de TNT. Esta clase de suceso ocurre alrededor de una vez al año. Con menor frecuencia, rocas aún mayores producen estallidos de gran violencia. En junio de 1908 se vio descender una gigantesca bola de fuego sobre la región siberiana de Tunguska; a continuación, una enorme explosión arrasó más de 2000 kilómetros cuadrados de bosque. El consenso actual mantiene que un asteroide rocoso de 60 metros de diámetro estalló unos seis kilómetros por encima del suelo con una fuerza de alrededor de 10 megatones de TNT. La onda expansiva devastó un área del tamaño de Nueva York.

PAT RAWLINGS/SAIC



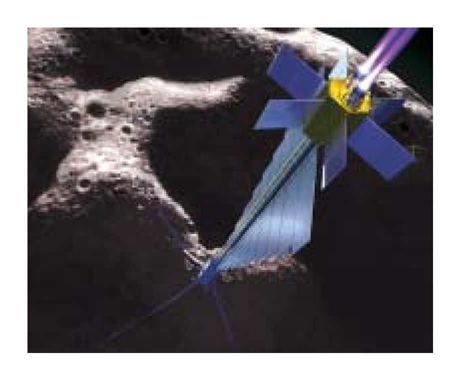
UN REMOLCADOR ESPACIAL empuja un asteroide en esta interpretación artística de una posible misión de desviación. Impartiría ese impulso constante en la dirección deseada gracias a sus motores de plasma. Un conjunto de paneles radiadores disiparían el calor del reactor nuclear de la nave, situado en la parte más cercana a la superficie del asteroide. Los brazos articulados fijan el remolcador a la superficie y lo estabilizan.

Observaciones recientes de los denominados “objetos cercanos a la Tierra” —asteroides y cometas cuyas trayectorias podrían interceptar la órbita terrestre— indican que la probabilidad de que ocurra un suceso similar en este siglo es de un 10 por ciento. Los asteroides que superen los cien metros de diámetro representan una amenaza aún peor: penetrarían más en la atmósfera y llegarían al suelo. Un impacto de esta clase, que tiene una probabilidad de ocurrir antes de 2100 del dos por ciento, produciría una explosión equivalente a 100 megatones o más de TNT. Si un asteroide grande chocase en el océano, lo que sucede en aproximadamente el 70 por ciento de los impactos, el tsunami mataría a millones de personas al inundar las ciudades costeras. Sucesos de este tipo suceden más o menos una vez cada 40.000 años. Un asteroide con un diámetro superior a un kilómetro golpearía la Tierra con 100.000 megatones de TNT, una energía mucho mayor que la combinada de todas las armas nucleares existentes. Impactos de esta magnitud, o mayores, podrían incluso exterminar la civilización humana; hay una probabilidad de quizás 1 entre 5000 de que un cataclismo así suceda en este siglo.

¿Puede la humanidad evitar esas catástrofes? En los últimos años se han propuesto varias maneras de desviar un asteroide que se dirija frontalmente hacia la Tierra (*véase el recuadro* “Contra los asteroides peligrosos”). Una de ellas consistiría en detonar un arma nuclear sobre o cerca del asteroide para fragmentarlo o cambiar su rumbo. Pero los efectos de una detonación nuclear son difíciles de predecir; esa incertidumbre ha llevado a muchos a ver esa opción como un último recurso, en el mejor de los casos. El interés se ha centrado en formas mejor controladas de desviar la trayectoria de un asteroide. Durante los dos últimos años hemos estudiado una de ellas: un remolcador espacial no tripulado que llegaría hasta el asteroide incidente, se fijaría a su superficie y lo iría empujando para que no chocase contra la Tierra. (Debido a las peculiares características de los cometas, esta propuesta no se refiere a ellos. Recientes estudios indican que constituyen sólo alrededor del uno por ciento de las amenazas de impacto contra la Tierra.) Llevaría motores impulsados por energía nuclear que expulsarían chorros de plasma (una mezcla de iones y electrones a alta temperatura). Creemos que en 2015 podría ya realizarse una exhibición del método.

¿Por qué habría que crear ahora una nave espacial así, antes de que se haya identificado un asteroide que vaya a chocar contra la Tierra? Porque se debería ensayar el sistema antes de que se lo necesite urgentemente. Probar a desviar un asteroide que no describa, ni siquiera de lejos, una trayectoria de colisión aportaría la experiencia necesaria para desarrollar una defensa fiable. No se han estudiado todavía los asteroides potencialmente peligrosos; como no sabemos gran cosa de la disposición de su interior, de sus características superficiales o de su integridad estructural, no podemos saber qué ocurriría si un remolcador espacial actuase sobre uno de ellos. Para obtener información sobre estos aspectos cruciales, lo mejor es aterrizar con una nave espacial en un asteroide e intentar moverlo. De paso, la misión ampliaría nuestro conocimiento sobre los asteroides, abriría el camino a su explotación minera y probaría sistemas que valdrían también para la futura exploración del sistema solar.

Además, la NASA ya trabaja en las técnicas que necesitaría el remolcador de asteroides. Como parte del Proyecto Prometeo, ha emprendido el diseño de reactores nucleares que puedan alimentar sistemas de propulsión iónica para naves espaciales interplanetarias. Planea integrar estos sistemas en el Satélite de las Lunas Heladas de Júpiter (JIMO), que se espera visite las lunas jovianas de Ganímedes, Calisto y Europa durante la próxima década. Estos mismos dispositivos se podrían aplicar al mayor proyecto de seguridad pública de la historia: desviar la apocalíptica roca que más tarde o más temprano amenazará a la humanidad.

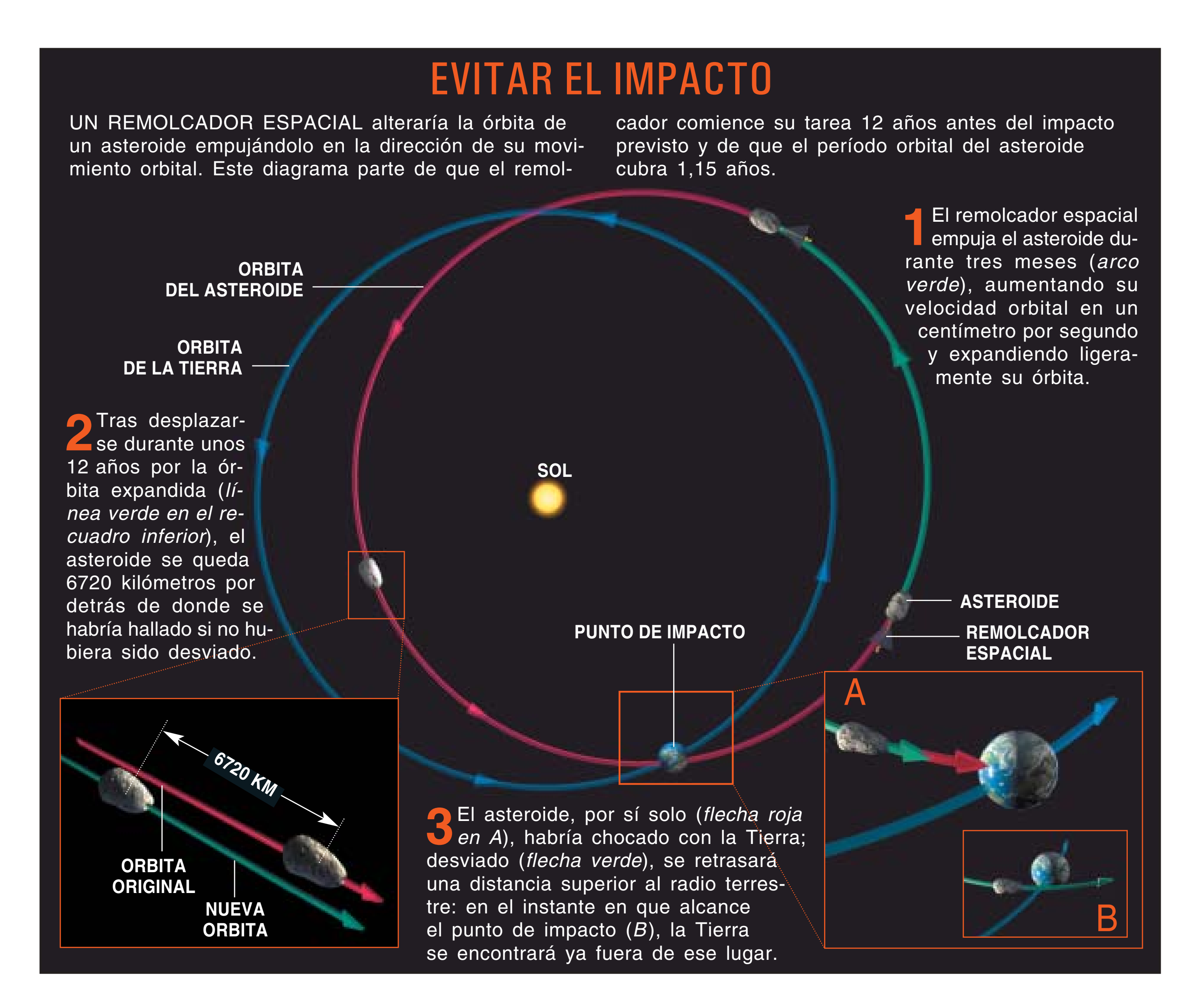


Resumen/*Alterar la órbita de un asteroide*

- Los asteroides representan una amenaza para la humanidad. El impacto directo de un asteroide de cien metros de diámetro destruiría una gran ciudad; un objeto de un kilómetro podría aniquilar la civilización.
- Las anteriores propuestas para desviar un asteroide que se dirigiese hacia la Tierra —explosiones nucleares, impacto cinético— no resultan fiables. Pero un remolcador espacial equipado con motores de plasma lo impelería con suavidad de manera que su encuentro con la Tierra no se produjese; para ello habría que actuar con suficiente adelanto.
- En 2015 podría ensayarse un remolcador espacial. La NASA ya está desarrollando reactores nucleares y sistemas de propulsión aptos para esa misión.

La misión B612

El problema de desviar un asteroide se reduce a proceder en los momentos oportunos. En primer lugar, se debe observar el asteroide al menos diez años antes del impacto para que dé tiempo a llevar a cabo las acciones que se hayan decidido. Afortunadamente, con la continua mejora de los programas de detección de asteroides ésa es una expectativa razonable. Para evitar que la roca choque con la Tierra, el plan más eficaz consiste, bien en acelerar el cuerpo celeste, empujándolo en la dirección de su movimiento orbital, bien en frenarlo



impeliéndolo en la dirección contraria. Al cambiar la velocidad del asteroide se altera su período orbital, el tiempo que tarda en dar una vuelta alrededor del Sol. Como la Tierra se mueve en su órbita a una velocidad media de 29,8 kilómetros por segundo y su diámetro es de 12.800 kilómetros, tarda 215 segundos en desplazarse la mitad de su diámetro. Si un asteroide se dirigiese hacia una colisión frontal con la Tierra, habría que cambiar el período orbital del asteroide para que llegase al lugar de encuentro al menos 215 segundos antes o después de que lo haga la Tierra; la roca cuerpo celeste pasaría así a gran velocidad sin daño para nuestro planeta (*véase el recuadro* "Evitar el impacto").

Aplicando al asteroide un suave pero prolongado impulso unos 10 años antes del momento en que debería colisionar con la Tierra, el remolcador tendría que aumentar la velocidad del asteroide en sólo un centímetro por segundo. Este cambio ampliaría ligeramente la órbita del asteroide y alargaría el tiempo que tarda en girar alrededor del Sol. Por ejemplo, para un asteroide con un período orbital de dos años, un cambio de velocidad de un centímetro por segundo aumentaría su período en 45 segundos y crearía un retraso de 225 segundos a lo largo de diez años, suficiente para que, por poco, no chocase con la Tierra. O bien, el remolcador espacial podría frenar el asteroide, recortar su órbita y reducir el período en 45 segundos; diez años después, llegaría al punto de encuentro 225 segundos antes que la Tierra. Si el remolcador espacial arriba al asteroide cuando está más próximo al choque con la Tierra, habrá de dar un empujón mayor al cuerpo celeste. De ahí la importancia de una detección precoz y precisa de los asteroides cercanos a la Tierra (*véase el recuadro* "Limpieza celeste").

Para ensayar este procedimiento, hemos sugerido que se construya un remolcador espacial que pueda desviar un asteroide de 200 metros de diámetro; un objeto así causaría una devastación regional. Hemos denominado a este proyecto de prueba "misión B612" (B612 se llama el asteroide de *El Principito* de Antoine de St. Exupéry). Un asteroide rocoso de 200 metros tiene una masa de unos 10.000 millones de kilogramos. En lugar de conferirle al asteroide un breve y fuerte impulso —podría hacerlo añicos en vez de alterar su rumbo—, el remolcador B612 ejercería una suave presión. La fuerza sería de sólo 2,5 newton, equivalente a la que se requiere para

ALFRED T. KAMAJIAN

sostener un vaso de leche. Pero si este ligero toque se aplicase durante sólo tres meses, sería suficiente para cambiar la velocidad del asteroide en 0,2 centímetros por segundo. Si nos enfrentásemos con una amenaza real de un asteroide de 200 metros, nuestra pequeña exhibición tendría que quintuplicar, al menos, su efecto para evitar que el cuerpo se estrellase contra la Tierra, o de lo contrario tendríamos que actuar 50 años antes del impacto.

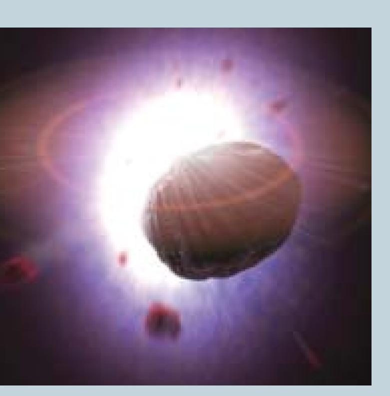
Como se habría de aplicar la fuerza sin cesar durante un período prolongado, los motores del remolcador espacial necesitarían una cantidad notable de combustible. Debería cargar además el que necesitase para alcanzar el asteroide. El cambio medio de velocidad para llegar desde nuestro planeta hasta un asteroide normal, cercano a la Tierra, es de unos 15 kilómetros por segundo, un tercio más del cambio de velocidad necesario para escapar a la gravedad terrestre. Los propulsores químicos, cohetes que mezclan un combustible con oxidante en una cámara de combustión, a duras penas podrían impulsar una nave espacial de un tamaño considerable (más todo el combustible necesario para empujar el asteroide) hasta esas velocidades. Habrían de ir tan cargados para realizar la misión B612, que no se podría lanzarla con un solo cohete; se necesitarían docenas de cohetes de gran fuerza ascensional para impulsar los componentes hacia una órbita terrestre baja. La nave se ensamblaría en órbita, lo que aumentaría drásticamente el coste de la misión y retrasaría el viaje hacia el asteroide.

Queremos diseñar un remolcador espacial que se pueda lanzar con un solo cohete de gran fuerza ascensional, como un Proton, Ariane 5 o Titan 4. Puesto que el remolcador deberá tener una masa total inferior a 20 toneladas, necesitará motores que saquen un gran rendimiento a su combustible. La principal me-

Contra los asteroides peligrosos

LOS DIVERSOS PLANES concebidos para desviar un asteroide destinado a chocar contra la Tierra entran en dos categorías: los que confían en breves pero intensas aplicaciones de fuerza y los que ejercerían un suave tirón o empujón sobre el cuerpo celeste durante largo tiempo.

EXPLOSIONES NUCLEARES. De dos maneras se podrían aplicar. Lo más simple sería hacerlo añicos. Pero cabría también detonar un dispositivo nuclear frente a un lado del asteroide, que se calentaría así intensamente. La vaporización de las rocas superficiales en esa cara aceleraría ligeramente en dirección contraria el cuerpo entero. La ventaja de ambas opciones es que ya se dispone de las técnicas necesarias y el despliegue sería rápido. En teoría, una potente explosión nuclear podría desviar un gran asteroide que estuviese a sólo unos meses de chocar contra la Tierra; ningún otro procedimiento sería capaz de tanto. Pero no podemos predecir ni controlar el resultado. La explosión podría partir el asteroide en varios trozos grandes; el problema no sólo no se resolvería, sino que empeoraría.



UNA EXPLOSION NUCLEAR podría partir un asteroide en lugar de cambiar su rumbo.

IMPACTO CINETICO. También estas propuestas aprovechan la técnica existente. Se estrella contra el asteroide amenazador la mayor sonda espacial disponible, a la que se habrá impartido la máxima velocidad posible. Debido a las velocidades relativas tan altas necesarias para desviar un asteroide de cierto tamaño, la principal dificultad estribaría en guiar la sonda espacial de forma que toda su energía de impacto se emplease en desviar el asteroide de su curso y no en hacerlo rotar o en arrancarle un sector. Como ocurre con las explosiones nucleares, se corre el riesgo de fragmentar el asteroide.

IMPULSOR DE MASA. Se trataría de un dispositivo construido sobre la superficie del asteroide que arrojaría una y otra vez rocas hacia el espacio; el astro se aceleraría poco a poco en dirección opuesta. Si se lanzan suficientes rocas en la dirección adecuada, la velocidad del asteroide variará lo suficiente como para evitar una colisión con nuestro planeta. La ventaja es que se arrojan materiales desde el propio cuerpo celeste, lo que evita la necesidad de transportar tanto combustible desde la Tierra. No obstante, el lanzamiento de rocas aún necesita una fuente considerable de energía. El diseño de esta máquina y su instalación robótica en la superficie serían tareas imponentes.

LA ABLACION. El mismo efecto que la explosión nuclear frente a una cara del asteroide, pero por una vía mucho más lenta. Se calentaría una pequeña área en un lado del asteroide mediante un potente láser que volase cerca del asteroide o con la luz solar reflejada por un espejo espacial de gran tamaño. El material superficial vaporizado impulsaría al asteroide en la dirección deseada. La ventaja de esta opción estriba en que no hay que preocuparse de la rotación del asteroide. Pero el láser o el espejo habrían de mantener su posición con precisión al lado del asteroide durante un período largo; por lo tanto, necesitarían una cantidad notable de combustible. Además, el material desprendido durante la ablación podría cubrir los elementos ópticos.

LA PRESION SOLAR. Una sonda espacial revestiría la superficie del asteroide con pintura muy reflectante. Se alteraría así la presión de la radiación solar y, muy poco a poco, el rumbo del asteroide iría variando. No obstante, cuesta ver esta técnica como una opción factible debido a la ingente cantidad de pintura exigida y la dificultad de aplicarla sobre la superficie.

ATERRIZAR Y EMPUJAR. El fundamento del remolcador espacial. Se trata de un método muy directo. El sistema de propulsión necesario para llegar al asteroide, que de todas formas sería necesario también para las otras ideas, valdría para desviar la roca. La mayor ventaja de esta opción reside en el proceso, que se controlaría perfectamente; la mayor dificultad, y en poder maniobrar la sonda espacial y fijarla al asteroide.

PAT RAWLINGS/SAIC

dida del rendimiento de un cohete es el impulso específico, o empuje generado por cada unidad de combustible consumida por segundo. Los cohetes químicos de mayor rendimiento tienen un impulso específico de hasta 425 segundos cuando funcionan en el vacío del espacio (el impulso específico se mide en segundos). Pero los motores de nuestro remolcador de asteroides deben tener un impulso específico de 10.000 segundos.

Este rendimiento no es factible para los cohetes químicos ordinarios, pero cae con holgura dentro de lo posible para los motores eléctricos, que usan campos eléctricos o magnéticos para acelerar iones hacia el exterior del cohete. De esta forma consiguen velocidades en la tobera mucho mayores que los cohetes químicos, que sólo queman combustible de manera que los gases calientes que se expanden escapen afuera. Ya han volado por el espacio, con éxito, motores iónicos con un impulso específico de 3000 segundos. Un nuevo motor prometedor, VASIMR (Cohete de Magnetoplasma con Impulso Específico Variable), utiliza ondas de radio para ionizar un gas y acelerar el plasma hasta velocidades de salida aún mayores [*véase* "El cohete VASIMR", por Franklin R. Chang Díaz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2001]. El VASIMR no dirige mediante una tobera ordinaria el flujo de iones en expansión, sino que se vale de campos magnéticos para encauzarlo afuera con impulsos específicos de entre 3000 y 30.000 segundos.

Hay que pagar un precio para llegar a este rendimiento tan elevado. Aunque los motores de plasma rinden más que los cohetes químicos, su empuje es mucho menor (ya que el plasma expulsado a alta temperatura es muy tenue). Varios motores actualmente en desarrollo podrían alcanzar impulsos específicos que se aproximan al objetivo de 10.000 segundos, pero con la excepción del VASIMR, la mayoría de los motores eléctricos generan menos de 0,1 newton de fuerza. Se tendrían que montar conjuntamente muchos de estos motores para lograr el nivel deseado de empuje de 2,5 newton. Aun cuando actúen simultáneamente, los motores deben impulsar el asteroide durante un tiempo muy largo para alterar su órbita. Se han conseguido largos tiempos de funcionamiento: el motor iónico en la nave espacial Deep Space 1, lanzado en octubre de 1998, acumuló 677 días de tiempo encendido.

Para proporcionar el empuje exigido, los motores de plasma necesitarían alrededor de 250 kilowatt de energía eléctrica (suponiendo un rendimiento del motor del 50 por ciento). Muy cortos se quedan los paneles solares de una pequeña nave espacial. Incluso los enormes paneles solares de la Estación Espacial Internacional, cuando esté terminada, producirán menos de la mitad de esta cantidad, y pesarán más de 65 toneladas. Tamaña envergadura abrumaría a una nave espacial que debe pesar menos de 20 toneladas en total. La fisión nuclear es la única técnica actual que puede suministrar de forma continua esta cantidad de energía durante varios años con una instalación que pese sólo unas pocas toneladas.

LA MISION B612

LA MISION B612 persigue alterar de manera perceptible y controlada la órbita de un asteroide en 2015. Habría de fijarse en la superficie del asteroide elegido y demostrar su capacidad de manejar el objeto.

ALFRED T. KAMAJIAN

Los autores

RUSSELL L. SCHWEICKART, EDWARD T. LU, PIET HUT y CLARK R. CHAPMAN formaban en octubre de 2002 la Fundación B612, grupo sin ánimo de lucro dedicado a la demostración de que es posible desviar asteroides. Schweickart, presidente del consejo de la fundación, es un antiguo astronauta de la NASA; pilotó el módulo lunar del Apolo 9 en 1969 y sirvió como comandante de reserva en la primera misión del *Skylab* en 1973. Lu, presidente de la fundación, es astronauta en activo; envió por correo electrónico sus contribuciones a este artículo mientras se encontraba a bordo de la Estación Espacial Internacional. Hut es profesor del Instituto para Estudios Avanzados en Princeton; investiga la astrofísica computacional y los sistemas estelares densos. Chapman, miembro del Instituto de Investigaciones del Sudoeste, en Boulder, forma parte del equipo científico de la próxima misión *Messenger* a Mercurio.

El remolcador de asteroides necesita un reactor nuclear sencillo, pequeño y seguro. La NASA ya ha propuesto algunos diseños nuevos para reactores de naves espaciales; uno de ellos ha pasado incluso por pruebas preliminares. Presentan una característica que refuerza su seguridad: el combustible nuclear apenas si es radiactivo hasta que el reactor no haya producido energía durante un notable lapso de tiempo. Como el reactor partiría en frío —es decir, inactivo—, un accidente catastrófico en el lanzamiento causaría sólo un pequeño daño ambiental. Si el núcleo entero de uranio del SAFE-100, un reactor espacial avanzado que se desarrolla en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, se dispersase por culpa de una explosión durante el lanzamiento, la radiación liberada en el ambiente sería sólo de seis a diez curie, inferior a la radiación total contenida en las paredes de la Estación Central de Nueva York. Los controladores terrestres enviarían la orden que activaría el reactor una vez se encontrase en el espacio.

Limpieza celeste

EL 18 DE MARZO DE 2002 se informó de que la Tierra se había librado por muy poco del impacto de 2002 MM7, asteroide recién descubierto. Esta roca de 70 metros de longitud se observó cuatro días después de que pasara a 461.000 kilómetros de nuestro planeta, alrededor de 1,2 veces la distancia entre la Tierra y la Luna. Aunque se hablara tanto de él, 2002 EM7 es sólo uno de los cientos de miles de asteroides que se han acercado a la órbita terrestre o la han cruzado. “Rastreo de Vigilancia Espacial” es el nombre que recibe el plan internacional para detectar y seguir la pista a estos objetos amenazadores.

En 1998 la NASA, a instancias del Congreso de Estados Unidos, aprobó el proyecto de detectar el 90 por ciento de los cerca de 1100 objetos cercanos a la Tierra (NEO) de un diámetro superior a un kilómetro. A la mitad de este programa que durará diez años, se han encontrado más de 660 NEO de ese tamaño y más de 1800 cuerpos menores. Muchos de los asteroides a los que se está siguiendo actualmente fueron vistos por primera vez cuando se alejaban ya de la Tierra, como ocurrió con 2002 EM7. Por suerte, cualquier asteroide destinado con gran probabilidad a estrellarse contra la Tierra pasará, antes de chocar, miles de veces a unas pocas distancias lunares de nosotros. Si se identifica un objeto que apunta hacia nuestro planeta, destinado a impactar con él, lo más probable es que tal detección ocurra décadas o incluso siglos antes del desastre. Un descubrimiento cuando éste resulta ya inminente, parece sumamente improbable.

Cada vez que el Rastreo de Vigilancia Espacial detecta un nuevo NEO, se extrapola su órbita para determinar si podría chocar con la Tierra en los próximos cien años. La inmensa mayoría de los objetos descubiertos hasta ahora (más del 99 por ciento) no parece que representen una amenaza. En raras ocasiones, la Vigilancia Espacial ha encontrado un NEO para el que se predice un acercamiento a la Tierra en unas décadas. Como la determinación de futuras órbitas, al igual que toda predicción, ofrece sólo una precisión limitada, uno de estos objetos podría estar realmente en rumbo de colisión. Así, la Vigilancia Espacial observa estos pocos NEO con el mayor cuidado, para mejorar gradualmente la exactitud de las predicciones de sus trayectorias.

Un asteroide con un diámetro de 200 metros no desencadenaría una devastación a escala planetaria, al contrario que una roca de un kilómetro de longitud, pero con una fuerza explosiva de 600 megatones aniquilaría una ciudad si impactase en sus cercanías. Aunque la Vigilancia Espacial ha encontrado muchos asteroides de este tamaño, se necesitarán telescopios mayores para dar con los 100.000 asteroides menores, aunque peligrosos, que cruzan la órbita terrestre. Ha habido varias propuestas de extender la búsqueda hasta incluir objetos de unos 200 metros. En el mejor de los casos, ese rastreo expandido no se completaría hasta dentro de 15 o 20 años.



EL RASTREO DE VIGILANCIA ESPACIAL observa con telescopios como éste, de la Base de Misiles de White Sands, en Nuevo México.

El problema de la rotación

La misión B612 habrá de solventar un difícil problema: maniobrar alrededor del asteroide elegido, aterrizar en él y fijarse a su superficie. En 2000 la nave espacial NEAR Shoemaker consiguió entrar en órbita alrededor de Eros, el segundo mayor de los asteroides conocidos cercanos a la Tierra, e incluso improvisó un aterrizaje en ese cuerpo celeste de 34 kilómetros de longitud. La sonda espacial japonesa Hayabusa (antes Muses-C), de propulsión iónica, se encuentra en estos momentos de camino hacia el asteroide cercano a la Tierra 1998SF36. Una vez allí, tocará ligeramente la superficie del asteroide varias veces para recoger muestras que traerá a la Tierra. Pero el remolcador de asteroides sería mucho mayor que cualquiera de estas sondas espaciales y habría de fijarse firmemente al asteroide porque la atracción gravitacional en la superficie de este tipo de cuerpos no llega a una cienmilésima de la gravedad terrestre. Se han sopesado varios tipos de mecanismos de sujeción, pero el diseño definitivo dependerá de los resultados de las misiones venideras que estudiarán la composición y estructura de los asteroides pequeños.

Para acelerar o frenar el asteroide, el remolcador espacial deberá mantener la dirección de empuje paralela al movimiento orbital del cuerpo. Pero muchos asteroides pequeños completan diez rotaciones o más al día. Podría superarse esta dificultad deteniendo la rotación antes de impeler el asteroide. El remolcador

aterrizaría en el ecuador del asteroide (el anillo situado a mitad de camino entre los dos polos del eje de rotación), apuntaría sus motores horizontalmente a lo largo del ecuador y los mantendría encendidos hasta que su empuje detuviese la rotación.

Este método, sin embargo, presentaría riesgos porque la mayoría de los asteroides rocosos parece que no son sino "montones de escombros" porosos y de baja densidad, una acumulación de muchos bloques grandes y pequeños, entremezclados con guijarros y granos menores, que se mantiene unida, sin mucha consistencia, por la endeble gravedad del cuerpo. Aunque este tipo de estructura podría soportar una fuerza de varios newton distribuida sobre una porción de su superficie de entre dos y cinco metros cuadrados, no se puede decir lo mismo de las tensiones internas producidas al frenar y detener la rotación del cuerpo. Parece muy probable que, al alterar las fuerzas gravitatoria y centrípeta delicadamente equilibradas asociadas a la rotación del asteroide, se producirían redistribuciones considerables y posiblemente destructivas; en otras palabras, habría terremotos en el asteroide.

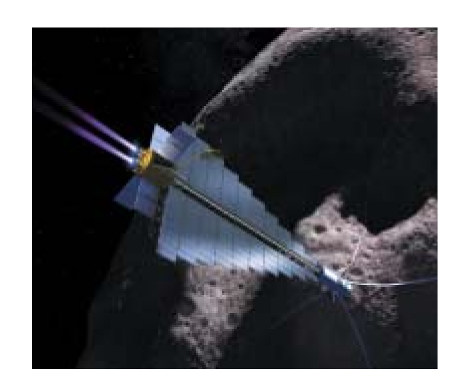
Por esta razón, quizá sería mejor que el asteroide siguiera rotando y proceder a desviar el eje de rotación poco a poco hasta que fuese paralelo con el movimiento orbital del cuerpo y mantenerlo ahí. Con el eje correctamente alineado, el remolcador empujaría al asteroide en rotación a lo largo de su órbita como un molinillo. Para la misión de demostración B612, seleccionaremos un asteroide que rote unas cuatro veces al día (una cantidad normal para los asteroides de este tamaño) y girar su eje de rotación de cinco a diez grados (*véase el recuadro* "La misión B612"). Aplicando 2,5 newton de empuje al polo norte o sur del asteroide, se requeriría un par de meses de actuación constante para obtener la desviación buscada. Si se lograse, quedaría demostrado que se puede alterar el movimiento de un asteroide, pero reorientarlo y acelerarlo en la dirección y medida necesarias para acabar con la amenaza llevaría muchos meses, incluso años.

Otra dificultad: desviar el asteroide de tal manera que no regrese unos cuantos años después con una nueva trayectoria de colisión. La gravedad lleva con frecuencia a los cuerpos que pasan cerca de la Tierra a órbitas resonantes, cuyos períodos son proporcionales al de la Tierra; así, esos cuerpos regresan periódicamente a las cercanías de nuestro planeta. Por tanto, debemos desviar el asteroide hacia una trayectoria que no lo conduzca a una órbita resonante. La precisión necesaria para ello es uno de los mejores argumentos a favor del remolcador de asteroides. Las maniobras de remolcador se controlan meticulosamente. Las demás opciones ofrecen un cambio de velocidad aproximado e incontrolado; con ellas se corre el riesgo de que el cuerpo celeste se convierta en un bumerán.

La protección de nuestro planeta

La misión que proponemos costaría unos mil millones de dólares —poco más del uno por ciento de los gastos de la NASA previstos para los próximos diez años—, siempre y cuando se recurra a sistemas de propulsión y de energía ya desarrollados, y si basta con un solo vehículo de lanzamiento de los ya existentes para lanzar la sonda espacial. ¿Se merece este proyecto tal gasto? Aunque sólo se lo vaya a necesitar raras veces —nunca, esperamos, durante nuestras vidas—, el valor de un sistema de desviación de asteroides resultaría incalculable. Una colisión de un asteroide con la Tierra sería tan devastadora, que para evitarla valdría la pena pagar cualquier precio. La misión B612, al intentar la desviación de un asteroide, nos enseñaría si es factible remolcar asteroides y, si lo fuese, las mejoras convenientes en caso de una amenaza de impacto real.

Los beneficios científicos de una misión de exhibición resultarían también notables. Los asteroides son restos del primitivo sistema solar y tienen mucho que decirnos sobre la formación de los planetas y quizás incluso sobre los orígenes de la vida. Se ha obtenido ya mucha información estudiando los meteoritos, los fragmentos de residuos asteroidales que han sobrevivido a la abrasadora caída a través de la atmósfera terrestre, pero mucho más se conseguiría visitando el origen de esos pedazos.



Además, se piensa que los asteroides contienen grandes cantidades de metales, minerales y agua helada. El aprovechamiento de estos recursos podría reducir drásticamente el coste de futuros vuelos interplanetarios. La misión B612 mostraría gráficamente que una sonda espacial podría acceder a estos materiales; con las mismas técnicas de maniobra y atraque desarrolladas para el remolcador de asteroides, otros vehículos podrían aterrizar en ellos y explotarlos como minas. Y así se podría incluso facilitar una misión tripulada a un asteroide cercano a la Tierra. Muchos expertos sostienen que enviar astronautas a un asteroide sería más rápido, menos costoso y más valioso que una misión tripulada a Marte.

Bibliografía complementaria

RAIN OF IRON AND ICE: THE VERY REAL THREAT OF COMET AND ASTEROID BOMBARDMENT. John S. Lewis, Perseus, 1997.

COSMIC PINBALL: THE SCIENCE OF COMETS, METEORS, AND ASTEROIDS. Carolyn Sumners y Carlton Allen, McGraw-Hill Trade, 1999.

REPORT OF THE WORKSHOP ON SCIENTIFIC REQUIREMENTS FOR MITIGATION OF HAZARDOUS COMETS AND ASTEROIDS. Michael S. Belton. National Optical Astronomy Observatory, marzo 2003.

El conocimiento etnobotánico de los tsimane'

Los indígenas han desarrollado un vasto conocimiento sobre cómo utilizar las plantas en su vida cotidiana, compartido por los miembros de una misma etnia. De ello nos dan un ejemplo especial los tsimane'

Victoria Reyes García, Vincent Vadez, Elizabeth Byron, Ricardo Godoy, Lilian Apaza, Eddy Pérez y Tomás Huanca

Como cualquier otro día, Epifanio sale de su casa temprano. Va al bosque. Sólo lleva consigo un machete y una bolsa tejida de algodón. Sabe que todo lo que necesite hoy lo encontrará en la selva: frutos silvestres para comer, bejucos con los que tejer un cesto si caza algún animal y hasta medicinas si se indispone. Es incluso casi seguro que esta noche regrese con una gran cesta llena de palmas, frutos silvestres y las hojas de un árbol que crece a cierta distancia de la comunidad y que sirven para teñir algodón. Lo mismo que para otros muchos indígenas de la Amazonía, para Epifanio, de la tribu tsimane', las plantas y animales de la selva constituyen la base de su supervivencia. Pero la mera existencia de estos recursos de nada valdrían si Epifanio no supiera aprovecharlos.

Los tsimane'

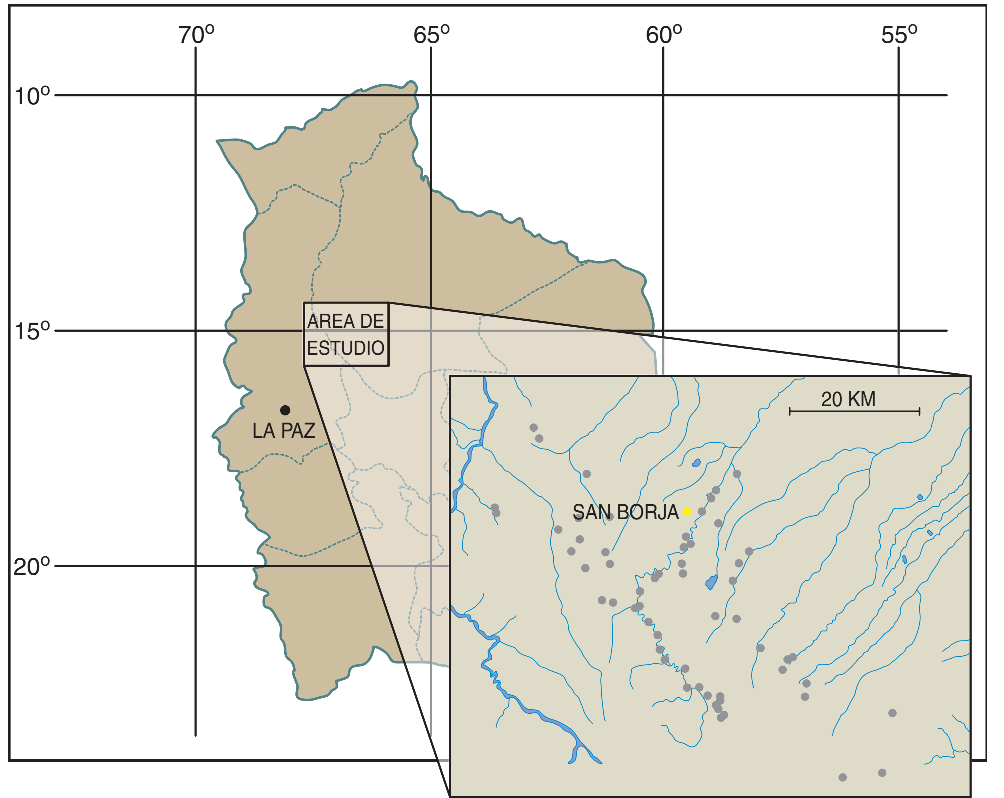
Los tsimane' son uno de los mayores grupos de la Amazonía boliviana, con una población aproximada de 7500 personas, agrupadas en unas 115 comunidades. Su territorio, que abarca poco más de 400.000 hectáreas, se extiende desde el pie de los Andes hacia los bosques tropicales del noreste, en las proximidades de la ciudad de San Borja, en Departamento boliviano del Beni.

Los tsimane’ vivieron bastante aislados hasta la segunda mitad del siglo XX, aunque se había entrado ya en contacto con ellos en el siglo XVII. Las primeras noticias de su existencia datan del tiempo de la colonia española. Durante el siglo XVII, los tsimane’ abandonaron muchos de sus asentamientos tradicionales para evitar a los europeos y se refugiaron en zonas más aisladas, como las fuentes de los ríos Maniqui y Apere, que todavía habitan. En el siglo XVIII, los jesuitas intentaron convertirlos al catolicismo y atraerlos a sus misiones. El proyecto fracasó. Los tsimane’ pronto abandonaron las instalaciones de las misiones para volver a la selva. De igual modo, ni las explotaciones caucheras de la región a lo largo del siglo XIX, ni el auge ganadero de principios de la centuria siguiente modificaron su relativo aislamiento. Sólo a mediados del siglo XX empezaron algunos tsimane’ a integrarse en la economía boliviana, trabajando en las estancias ganaderas y en la extracción de madera. Con la apertura de una carretera en la zona, en los años setenta, llegaron colonos y madereros; se acabó así, en parte al menos, el aislamiento en el que vivía este grupo indígena.

Tradicionalmente, los tsimane’ vivían cerca de los ríos, en pequeñas comunidades de no más de cinco familias emparentadas. Llevaban una existencia seminómada y cambiaban a menudo de asentamiento, en busca de nuevos lugares de caza y pesca o de nuevas tierras para cultivar. Se casaban sólo con sus primos cruzados. La poligamia era frecuente: el hombre tenía dos o más mujeres, habitualmente hermanas. En el sistema de parentesco se basaba la organización social. Las personas mayores desempeñaban un importante papel en la toma de decisiones y en la transmisión del conocimiento. Entre los tsimane’ no existía una organización jerárquica; sólo los curanderos contaban con algo más de fuerza en la toma de decisiones, ya que poseían no sólo el poder de curar, sino también la capacidad de comunicarse con los espíritus de los antepasados, así como de recibir los favores de los espíritus de los seres naturales. Los tsimane’ eran animistas, es decir, creían que estaban rodeados por espíritus dueños de los antepasados, así como de las plantas, los animales y los minerales de la selva. Antes de emprender una expedición de caza o antes de cortar un árbol, los tsimane’ pedían permiso al espíritu “dueño” de los mismos, para evitar su enojo.

Hoy, algunos tsimane’ (principalmente los que viven alejados de las ciudades) siguen manteniendo estas creencias y formas de vida. Sin embargo otros, sobre todo los que habitan cerca de los pueblos de colonos, han entrado en contacto con la economía y la sociedad nacional. Su sistema social y cultural ha sufrido un cambio profundo. Desde los años ochenta, algunas comunidades tsimane’ se han vuelto más estables y han crecido en tamaño. Las mayores están formadas por unas 30 familias, que se agrupan alrededor de una escuela. En muchas de esas comunidades, la autoridad de los ancianos ha quedado postergada por la figura del corregidor, el nuevo encargado de representar a la

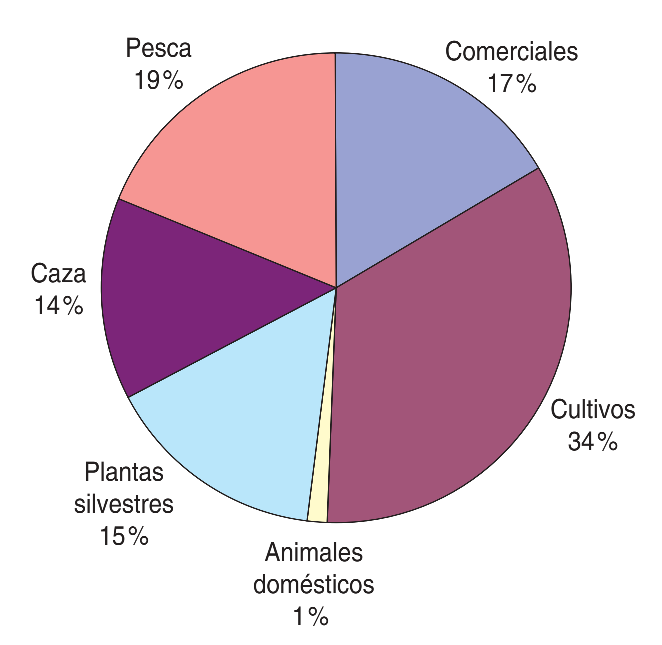




1. TERRITORIO TSIMANE’. La mayoría de las comunidades tsimane’ se encuentran a orillas de los ríos Maniqui y Apere, en el Departamento boliviano del Beni. También las hay en el Parque Nacional Pilón-Lajas, en el Territorio Multiétnico y en el Parque Nacional Isiboro-Secure. Los tsimane’ consiguieron el reconocimiento legal de su territorio en 1992 con la Marcha Indígena por el Territorio y la Dignidad. Sin embargo, desde entonces se han hecho pocos avances en el saneamiento del territorio y en la elaboración de un plan para su gestión, por lo que los conflictos en la zona son frecuentes. En el mapa, la ubicación de las comunidades Tsimane’ estudiadas.

VICTORIA REYES GARCIA, VINCENT VADEZ, ELIZABETH BYRON, RICARDO GODOY, LILIAN APAZA, EDDY PEREZ Y TOMAS HUANCA

comunidad frente a otros organismos e instituciones. Muchos de los tsimane' que viven cerca de los pueblos ya no se casan con sus primos. Cada vez es más frecuente encontrar matrimonios entre tsimane' y no tsimane'. Influidos por los misioneros evangelistas, muchos han abandonado sus creencias y prácticas animistas por la nueva religión.



2. DISTRIBUCION DEL VALOR de los productos consumidos en un hogar tsimane'. Se puede considerar a los tsimane' una sociedad de cazadores-recolectores que practica la agricultura de subsistencia. La mayoría de los productos que se consume en un hogar tsimane' proviene de la selva (caza y pesca). La agricultura desempeña también una función importante en su economía. Los ingresos generados por el trabajo asalariado y las transacciones comerciales son bajos.

Los tsimane' y la selva

A pesar de las diferencias culturales que encontramos hoy día entre los tsimane', se sigue considerando a este grupo indígena una sociedad de cazadores-recolectores, dedicados a una agricultura de subsistencia. El consumo de los hogares tsimane', tanto los que siguen en relativo aislamiento como los que viven más cerca de las ciudades, se basa más en los productos de la selva que en los ingresos monetarios o la siembra. Una característica de las economías autárquicas es que una gran parte de los ingresos proviene del consumo y no entra en el hogar en forma de dinero: el valor de los productos consumidos en el hogar se cuenta como ingreso. Al año, un hogar típico tsimane' tiene un ingreso medio de unos 1750 dólares estadounidenses. De estos, sólo unos 300 proceden del trabajo asalariado, la venta o el trueque en especie. Los restantes 1450 dólares no entran nunca en el hogar en forma de dinero; es el valor de los productos consumidos por los miembros de la unidad familiar a lo largo del año. La parte mayor del consumo de un hogar tsimane' (unos 850 dólares hogar/año) proviene de las plantas y animales que encuentran en la selva próxima a la comunidad. Otra parte (unos 600 dólares hogar/año) procede de los productos agrícolas que obtienen de sus huertos. Por último, su consumo de animales domésticos, principalmente gallinas y cerdos, se acerca a unos 25 dólares hogar/año. En resumen, el bosque constituye la base de la subsistencia de los tsimane'.

Hoy en día, de entre todos los recursos que obtienen de la selva, los más importantes son la caza, la pesca y la recolección de plantas silvestres. Tradicionalmente, los recursos minerales, la sal por ejemplo, tenían también una relevancia destacada en la vida de los tsimane', pero han sido sustituidos por productos comerciales, que resultan mucho más cómodos. No se organizan ya expediciones en busca de sal, porque resulta más fácil comprarla en el mercado, los mecheros han substituido la yesca para encender el fuego y las ollas de aluminio ocupan ahora el lugar de las frágiles de arcilla.

Contrariamente a lo expuesto a propósito de los minerales, la pesca y la caza siguen desempeñando una función notable en la forma de vida tsimane', comparadas con otros recursos, como los animales domésticos o la carne de ganado. De la pesca en ríos y lagunas obtienen su principal fuente de proteína animal. Un hogar tradicional tsimane' consume hasta unos 200 kilos de pescado al año. Se trata de una actividad sobre todo masculina. Los hombres la practican desde niños. Pero, a diferencia de la caza, no es raro que las mujeres participen en la pesca, cuando no la practican solas. Los tsimane' pescan a lo largo del año entero; si bien, los lugares y los métodos utilizados varían según la estación. La pesca es más abundante en la estación seca (julio-noviembre), cuando los grandes bancos migran río arriba. En esa época, baja el nivel del río, lo que permite practicar la pesca con arco y flecha y barbasco. Este último método de pesca, por intoxicación, consiste en cerrar una parte del río con cortezas de árboles para que no entre más agua y los peces no puedan escapar. Una vez cegado el río, se arrojan plantas intoxicadoras y se espera a que los peces suban a la superficie para pescarlos con arco y flecha o con machete. Se practica principalmente río arriba, donde las corrientes son menores y los troncos de árboles caídos en el agua permiten represar el curso. Se recurre a la pesca con anzuelo durante la estación de lluvia, cuando aumenta el nivel del río. Durante esta época, se prefiere también, por razones de seguridad, la pesca en lagunas y arroyuelos.

Junto a la pesca, la caza constituye es una importante fuente de proteína. Cada año, en un hogar tsimane' entran unos 150 kilos de carne, que proviene de animales silvestres. Lo mismo de día que de noche, los hombres salen a cazar solos a la selva. En algunas ocasiones, por lo usual durante el mes de mayo, se forma un grupo de caza para expediciones más largas, alejadas de la comunidad, que duran entre una semana y diez días. Se puede conseguir en ellas abundante cantidad de carne, lo que obliga a

VICTORIA REYES GARCIA, VINCENT VADEZ, ELIZABETH BYRON, RICARDO GODOY, LILIAN APAZA, EDDY PEREZ Y TOMAS HUANCA

ahumarla o secarla al sol con sal para asegurar su conservación. A la caza tradicional con arco y flecha, con machete o con la ayuda de perros, han ido reemplazando nuevas técnicas más eficaces, como el rifle o la escopeta.

La agricultura de los tsimane' se desenvuelve en plena interrelación con la selva. Practican la agricultura de roza-tumba-quema. Entre los meses de mayo y agosto, durante la estación seca, se ayudan de hachas para clarear el bosque y crear suelo de cultivo. Cada familia tala con ese fin alrededor de una hectárea y media. Un par de meses más tarde, entre septiembre y octubre, queman la leña remanente y siembran la nueva parcela. Se dedica la mayor extensión al cultivo del arroz. A veces siembran plátano, maíz o yuca, intercalados con el arroz o en márgenes reservados. El arroz se cosecha cuatro meses después de su siembra. A veces los tsimane' reutilizan a parte de la parcela de arroz para sembrar maíz, plátano, caña de azúcar u otros. Nunca cultivan un mismo suelo durante más de dos o tres ciclos agrícolas seguidos. Dejan que la selva invada de nuevo el terreno y lo regenere. Sin embargo, los campos que quedan en barbecho pueden también aprovecharse cierto tiempo con la plantación de frutales y palmas. Acostumbran dejar pasar unos 20 años antes de volver a cultivar un mismo campo, aunque el aumento de población y la adopción de una agricultura comercial tienden a disminuir el tiempo de rotación.

Dependen también de la recolección de plantas silvestres. Les sirven de combustible, medicinas, alimento y materia prima para fabricar útiles.

Etnobotánica tsimane'

Conocen unas 410 plantas silvestres diferentes. De éstas sólo 46 no les reportan provecho alguno, mientras que las restantes cuentan con uno o varios usos. En su mayoría les sirven de remedio medicinal o de combustible. Abundan también las comestibles y las que constituyen la materia prima de sus útiles, chozas o canoas. Existe también un buen número con cuyas semillas fabrican collares. La sustancia extraída de algunas plantas se usa como tinte; la de otras sirve para los barbascos. Merece la pena detenerse en tales aplicaciones.

Medicina: La mayoría de las plantas que conocen tienen un uso medicinal. Se sabe de al menos 169 plantas silvestres o semicultivadas que sirven para tratar hasta 62 enfermedades. De cada planta no sólo saben qué partes poseen propiedades curativas, sino también su forma de preparación. Unas se hierven y se toman como infusión. Otras se frotan contra la zona dañada. Las hay que se aplican en emplastos y con otras se preparan baños. Muchas de estas plantas remedian, en su opinión, más de una enfermedad. Además, así como muchas plantas sirven para varias enfermedades, también algunas enfermedades se tratan con varias plantas. La farmacopea más variada concierne a las enfermedades más comunes. Por ejemplo, existen 23 plantas que sirven para tratar la diarrea, 17 que se utilizan como medicina contra la gripe y otras 17 contra los hongos de los pies. Aunque la mayoría de estas plantas medicinales medran en la selva, los tsimane' ponen mucho cuidado en proteger las que crecen espontáneamente en los jardines alrededor de su casa o en los campos dejados en barbecho.

Combustible: Aunque los usos medicinales son los que han recibido mayor atención por parte de los in-



VICTORIA REYES GARCIA, VINCENT VADEZ, ELIZABETH BYRON, RICARDO GODOY, LILIAN APAZA, EDDY PEREZ Y TOMAS HUANCA

3. BARBASCO o pesca por intoxicación. El barbasco se practica cerca del nacimiento de los ríos, donde las corrientes son pequeñas y se acumulan los troncos de árboles. Consiste en cerrar una parte del río con cortezas de árboles de forma que no entre agua y los peces no puedan escapar. Una vez represada parte del río, se sumerge en el agua el *vashi* (*Serjania sp.*). La resina de este bejuco tiene un componente que modifica la tensión superficial del agua; se bloquea la respiración de los peces, que deben subir a la superficie, donde se les atrapa. Además de ese bejuco, los tsimane' conocen al menos otras 7 plantas que se usan con la misma finalidad.



4. CULTIVOS: El arroz, el plátano y el maíz son los principales cultivos de los tsimane', base de su alimentación. El cultivo del arroz es un trabajo muy laborioso, desde la siembra hasta el almacenamiento del grano.

VICTORIA REYES GARCIA, VINCENT VADEZ, ELIZABETH BYRON, RICARDO GODOY, LILIAN APAZA, EDDY PEREZ Y TOMAS HUANCA

vestigadores, otras aplicaciones no resultan de menor importancia para los tsimane'. Es el caso de la leña. La mayoría de las plantas que entra en los hogares tsimane' se utilizan como combustible: cada familia trae por lo menos un tronco cada dos días. Conocen al menos 140 árboles diferentes con los que hacer leña. Diferencian entre dos categorías: la madera idónea para ahumar, porque produce mucha brasa y poca ceniza, y la que arde en fuego rápido, sin apenas brasas. Prefieren la leña que mantiene la brasa aunque se moje. Los troncos de la combustión proceden, en su mayoría, de los campos preparados para el cultivo.

Utensilios: Los tsimane' aprovechan una extensa variedad de plantas o partes de las mismas para fabricar todo tipo de utensilios, instrumentos y recipientes, básicos en su vida cotidiana. Así, con la parte central de ciertas especies, duras pero plásticas, esculpen grandes morteros donde se descascarilla el arroz o anchos recipientes donde almacenan la comida. Otros recipientes más efímeros, para guardar comida o bebida, se fabrican a partir de hojas de palma. También utilizan el pie de algunos árboles para crear una tabla ancha, o batán, en la que las mujeres tsimane' muelen el maíz. La cáscara dura del fruto del árbol que llaman tutuma les sirve de tazón; con la corteza de un bejuco tejen un gran cernidor.

Las hojas de diferentes palmas se trenzan con varios propósitos, desde la elaboración de esteras para sentarse o para dormir hasta bolsas para guardar o transportar la comida. Emplean otras hojas de palma para fabricar escobas. Los tsimane' conocen al menos 13 plantas de las que sacan fibras, la mayor parte de las veces de su corteza. Muchas de esas fibras tienen usos muy específicos (tejer bolsas, hacer esteras, amarrar, tejer cuerdas de arco, etcétera); no se puede sustituir una fibra por otra. Antiguamente, incluso la ropa y otros tejidos se elaboraban a partir de la corteza de *Poulsenia armata*. Apenas quedan ya mujeres que sepan elaborar tejidos de corteza, pues los tsimane' visten con ropas occidentales que compran en las ciudades cercanas a sus comunidades.

Algunos utensilios, como los imprescindibles arcos y flechas, se elaboran a partir de una combinación de plantas. Los arcos se obtienen de la parte exterior del tronco de una palmera. La corteza de una sola especie, *Cecropia concolor*, se raspa, remoja, golpea, y seca para fabricar las cuerdas de arco. El soporte de la flor de una especie de bambú (*Gynerium sagittatum*) se endereza con fuego para elaborar el cuerpo de las flechas. Para que éstas tengan mejor equilibrio, les pegan en la parte posterior plumas de diferentes aves; preparan esa cola con látex de un árbol. Ahí, cada artesano pone un toque de estética al pegar trocitos de pluma en el extremo, con algodón o látex de diferentes colores. El material usado para la elaboración de la punta de la flecha depende del animal que se quiera cazar. Las puntas de flechas para peces son afiladas y se hacen de la misma madera que los arcos. Cuando se pretende abatir una presa grande, preparan una punta de flecha, afilada y cortada de caña de un bambú. Para cazar aves y monos, se hace una punta de flecha redonda de una madera dura. A diferencia de otras puntas de flecha, éstas, redondas, no penetran en el animal, sino que la presa cae abatida por el impacto de la flecha.

Los autores

VICTORIA REYES GARCIA, VINCENT VADEZ, ELIZABETH BYRON, RICARDO GODOY, LILIAN APAZA, EDDY PEREZ y TOMAS HUANCA han estudiado los efectos de la economía de mercado en la vida de los tsimane' durante los últimos años. Reyes, Vadez y Huanca son investigadores asociados a la Escuela Heller de Altos Estudios Sociales y Gerenciales de la Universidad de Brandeis en Boston. Conviven ahora con los tsimane', en un proyecto de investigación sobre la adopción de nuevas técnicas agrarias. Godoy, profesor de Brandeis, dirige con ellos el estudio. Byron se doctoró en antropología por la Universidad de Florida con una tesis sobre los cambios en la nutrición de los tsimane' a medida que van adoptando la economía de mercado. Apaza y Pérez, licenciados en biología por la boliviana Universidad Mayor de San Andrés, han ahondado en el consumo de caza y pesca entre los tsimane'.

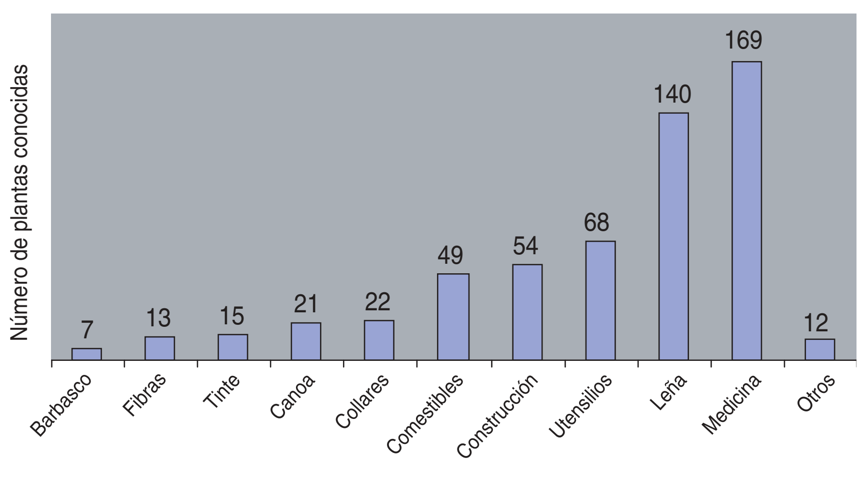
Construcción: Las casas tradicionales tsimane' estaban íntegramente levantadas con plantas. Se conocen hasta 54 especies diferentes empleadas en la construcción de una choza; variaban de acuerdo con la finalidad: techo, vigas, tirantes y amarres de los distintos componentes. El techo se construye con hojas de palma. Se escoge la hoja de una u otra palma según el tiempo que se quiera habitar la casa. El techo de las casas permanentes se construye con unos paños de hoja de jatata (*Geonoma deversa*) trenzada. Los paños de jatata son muy apreciados no sólo por los tsimane', sino también por la población no indígena de la zona, debido a que mantiene fresco el habitáculo y dura hasta 15 años. Sin embargo el trenzado de los paños es bastante laborioso, por lo que no se usa jatata para las chozas temporales, sino las hojas de otras palmas mayores. Estas hojas se doblan y superponen para elaborar la techumbre.

Los tsimane' conocen gran número de troncos que les sirven como vigas de sus casas. Por lo usual, el criterio en la selección es que sean densos y resistan la podredumbre y los insectos (como las termitas). En otros componentes de la casa, pensemos en los tirantes, no se busca tanto la resistencia cuanto que sean largos y rectos. Los componentes de la choza se atan entre sí con bejucos, flexibles y a la vez resistentes.

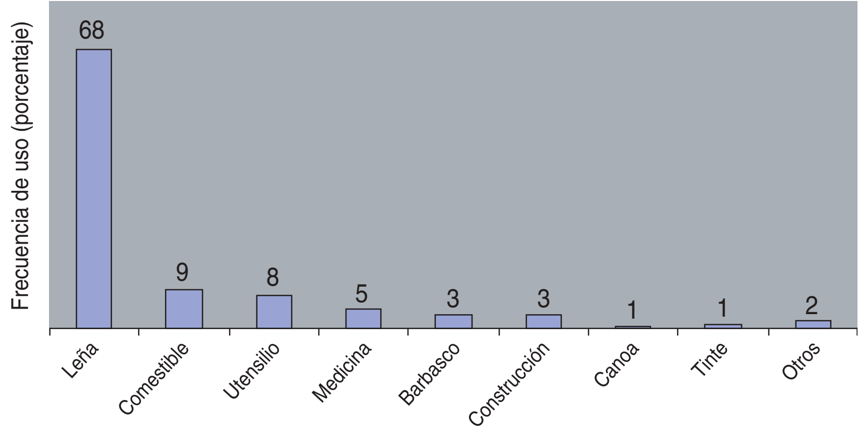
Plantas comestibles: Aunque la mayoría de las plantas que comen los tsimane' provienen de sus huertos o de los árboles frutales que plantan en los barbechos, se hallan también familiarizados con una cincuentena de plantas silvestres comestibles. Tras la madera de combustión, los frutos silvestres son el producto vegetal que con mayor frecuencia se traen de la selva. Predominan los frutos de palmeras. Esa recolección adquiere particular intensidad entre octubre y diciembre, meses en que maduran la mayoría de las especies de la región.

Canoas: Los tsimane' conocen al menos 21 árboles con los que fabrican canoas. No todas gozan del mismo aprecio. Las canoas se construyen a partir de un tronco. Su carpintería es un proceso laborioso que requiere no sólo la fuerza para manejar el hacha, sino también la destreza de vaciar el tronco sin que éste se rasgue o se parta, mientras se le da forma adecuada para que la canoa no se hunda. Se buscan maderas que no sean muy pesadas, no se pudren ni se partan rápidamente. Se valora la caoba (*Swietenia macrophylla*), debido a su durabilidad. Por tratarse de una madera noble, de enorme interés comercial, apenas existen ya canoas de caoba.

Tintes: Las mujeres tsimane' tejen bolsas de algodón natural que tiñen de varios colores con las substancias vegetales. Se emplean por lo



5. APROVECHAMIENTO DE LAS PLANTAS ENTRE LOS TSIMANE'. **La mayoría de las plantas útiles que conocen los tsimane' les sirven de medicina o combustible. Constituyen también la materia prima de sus instrumentos y canoas. Elaboran elaborar fibras o extraen barbasco. Con ellas levantan sus chozas, se alimentan o tiñen sus vestidos. Se valen de determinadas semillas para ensartar sus collares. La categoría "otros" abarca plantas ornamentales o que aportan alimento para los animales domésticos. El número en la gráfica corresponde al total de plantas con ese uso conocidas por los tsimane'.**



6. ¿PARA QUE USAN LAS PLANTAS LOS TSIMANE' EN SU VIDA COTIDIANA? **De la selva los tsimane' explotan sobre todo la madera que les sirve de combustible. Otros usos importantes son la comida y la elaboración de utensilios. El número en la gráfica corresponde al porcentaje de veces que una planta entra en un hogar tsimane' con un determinado uso.**

VICTORIA REYES GARCIA, VINCENT VADEZ, ELIZABETH BYRON, RICARDO GODOY, LILIAN APAZA, EDDY PEREZ Y TOMAS HUANCA



7. LA VIVIENDA TSIMANE'. La choza típica tsimane' está hecha íntegramente con material vegetal. El techo de hojas de palma viene apuntalado por seis troncos (tres delante y tres detrás). Tradicionalmente, las casas no estaban cercadas, aunque esta costumbre se practica cada vez más.

menos 13 especies silvestres. Al igual que con las medicinas, es necesario conocer la parte aprovechable de la planta, así como el proceso de preparación. De unas se usa la corteza, de otras las hojas o el interior del tronco, y de otras la raíz. Para obtener el tinte hay que triturar el material, mezclarlo con agua y a menudo hervirlo; finalmente, se sumerge en ese líquido el algodón blanco. Los tsimane' conocen plantas que tiñen de rojo, azul, verde, amarillo y marrón, entre otros colores.

El conocimiento etnobotánico y su uso comercial

Así pues, los tsimane' poseen un amplio conocimiento de los vegetales de su entorno y de los potenciales usos de cada uno. Muchos piensan que el saber indígena, sobre todo el relacionado con las plantas medicinales, lo poseen en exclusiva curanderos o chamanes, y se transmitiría de forma secreta y ritual de generación en generación. Sin descartar que esto sea posible para unos pocos saberes especializados, la realidad es que buena parte del conocimiento de los usos de plantas lo comparte la mayoría de los miembros del grupo. Incluido el saber sobre plantas medicinales. Las investigaciones etnobotánicas demuestran que la mayoría de las plantas medicinales son muy comunes, algunas son incluso malas hierbas; no se trata de plantas especiales y raras que crezcan en lugares inaccesibles. Similarmente, las investigaciones antropológicas nos enseñan que el conocimiento de las propiedades curativas y de otros usos potenciales de las plantas se encuentra difundido entre todos los miembros de un grupo.

En el caso de los tsimane', examinamos a más de 500 adultos (hombres y mujeres de varias edades) sobre sus conocimientos de las utilidades de las plantas. Todas las personas entrevistadas pertenecían a la tribu tsimane', pero vivían en 59 aldeas diferentes, algunas de ellas separadas entre sí más de 100 kilómetros. Al comparar sus respuestas, vimos que había un alto grado de concordancia: la mayoría de los entrevistados coincidía en los posibles usos de las 20 plantas sobre las que les preguntamos. Para estar seguros de que se trataba de un saber compartido, primero comparamos sólo las respuestas de personas que vivían en la misma comunidad; luego, comparamos las de todas las entrevistadas. Quienes vivían en la misma comunidad coincidían en más del 80 % de sus respuestas. Entre quienes moraban en lugares diferentes, el nivel de concordancia era sólo de algo más del 60 %, es decir, un 20 % menos que en el cálculo anterior. El hecho de que haya mayor acuerdo entre las personas que pertenecen a una comunidad que entre todas las personas del grupo indígena admite una explicación muy sencilla: más fácil coincidir con un grupo pequeño de

8. LA JATATA. La hoja de la jatata se teje en paños que se utilizan en los tejados. La jatata es muy apreciada no sólo por los tsimane', sino también por quienes viven en las ciudades cercanas. El intercambio de paños de jatata por productos comerciales es una de las principales fuentes de ingreso de muchos tsimane'. La jatata crece lejos de las comunidades. Se necesita todo un día para llegar al lugar donde crece, cortar la hoja y volver a la comunidad con un fardo, que llega a pesar hasta 30 kilos.





9. UTENSILIOS. Muchos utensilios usados por los tsimane' en su vida cotidiana se elaboran a partir de plantas. En el batán muelen maíz y plátano. El tacú es un mortero grande donde se descascarilla el arroz.



personas que con un grupo nutrido. Sin embargo, los resultados obtenidos en este examen demuestran que todos los tsimane' —sean cuales sean la comunidad y el hábitat en el que viven, su edad, sexo, nivel de educación o actividades económicas— coinciden ampliamente en la identificación de los usos apropiados de las plantas silvestres.

¿Por qué un grupo indígena, como los tsimane', puede compartir en tal medida su conocimiento sobre las aplicaciones de las plantas, no obstante las diferencias que encontramos en su interior? El reciente pasado seminómada de los tsimane' ayuda a explicar que dicho conocimiento haya estado tan compartido. El constante movimiento de una comunidad a otra —para ayudar a los familiares o simplemente visitarlos— constituye un importante factor en la transmisión y homogeneización del conocimiento. Pese a que cada vez son menos los tsimane' que practican una vida seminómada, quizá no ha transcurrido tiempo suficiente para que ese saber se fragmente. Tal vez se pierda a largo plazo, a medida que los objetos comerciales reemplacen las plantas y el conocimiento se vaya fragmentando entre las gentes del mismo grupo indígena.

En los últimos decenios, la cultura occidental ha tomado conciencia del valor encerrado en la familiaridad de los indígenas con las plantas silvestres. ¿Quién no ha oído hablar de las propiedades curativas de la "uña de gato"? El agua y la corteza de este bejuco que crece en la Amazonía han sido utilizadas tradicionalmente por multitud de grupos indígenas para el tratamiento de enfermedades gastrointestinales. La corteza del bejuco ha empezado a comercializarse en Europa y Estados Unidos. Sin embargo, ningún grupo indígena se beneficia por haber desarrollado el conocimiento de las propiedades curativas de la uña de gato. Sí, la industria farmacéutica.

Se ha desatado cierta polémica respecto a las concesiones de patentes a industrias que habían desarrollado productos comerciales aprovechando el conocimiento tradicional. La privatización del conocimiento tradicional y su uso comercial (en la industria farmacéutica, agrícola o cosmética) han generado un debate sobre la necesidad de reconocer y compensar a los indígenas que crearon esos saberes. Del mismo modo que los inventores patentan sus creaciones para poder recibir beneficios económicos de la empresa que decida comercializarlos, se plantea la obligación de que los indígenas sean compensados cuando una empresa decide comercializar un producto basado en lo que saben. Son varias las opiniones al respecto. Entre otras inquietudes, surgen preguntas como éstas: ¿Cómo se debe compensar? ¿A quién? ¿Cuánto? ¿Cómo va a afectar esa compensación a la forma de vida de los indígenas?

Se han propuesto varias formas de protección del conocimiento y de la compensación a los pueblos indígenas. Algunos investigadores argumentan que el derecho de las comunidades indígenas sólo se respeta si los proyectos de investigación toman acuerdos de "consentimiento informado previo", es decir, si consultan con toda la comunidad el proceso entero (desde el planteamiento teórico a la recogida de da-



10. TEJIDOS DE PALMAS. Las hojas de palmas tienen multitud de aplicaciones. Con ellas se tejen esteras y bolsas.

VICTORIA REYES GARCIA, VINCENT VADEZ, ELIZABETH BYRON, RICARDO GODOY, LILIAN APAZA, EDDY PEREZ Y TOMAS HUANCA



11. TEÑIDO E HILADO. Las mujeres tsimane' cultivan algodón, que hilan y tiñen con tintes naturales. Los hilos así preparados se utilizan para tejer bolsas, llamadas *sarai*, en cuyo interior guardan todo tipo de productos.

tos y la aplicación de los resultados). Este proceso debería respetar las normas culturales del grupo con el que se trabaje y reflejar las diferentes posiciones dentro del grupo. Otros creen que la mejor forma de proteger el conocimiento indígena consiste en catalogarlo por medio de bases de datos que puedan examinar los funcionarios de las oficinas de patentes antes de concederlas a productos que incorporen el conocimiento tradicional. Los grupos indígenas y sus defensores sostienen que no basta con una compensación económica. El punto de partida debe ser el respeto a las necesidades de los indígenas y no el beneficio económico de las empresas que venden productos basados en el conocimiento indígena. Para que esto sea posible deben establecerse derechos comunitarios (y no derechos privados) que reconozcan la naturaleza colectiva del conocimiento indígena y promuevan el desarrollo de los grupos indígenas. Hasta el momento no se sabía a ciencia cierta hasta qué punto el conocimiento indígena era realmente compartido. Los resultados explicados aquí confirman que lo es por un amplio grupo de personas y apoyan la demanda de los indígenas de que se creen "derechos de propiedad colectivos".

Bibliografía complementaria

INITIATIVES FOR PROTECTION OF RIGHTS OF HOLDERS OF TRADITIONAL KNOWLEDGE, INDIGENOUS PEOPLES AND LOCAL COMMUNITIES. Coordinadora de Organizaciones Indígenas de la Cuenca Amazónica. WIPO; Ginebra, 1998.

BIODIVERSITY AND TRADITIONAL KNOWLEDGE: EQUITABLE PARTNERSHIPS IN PRACTICE EARTHSCAN. S. A. Laird; Londres, 2002.

PLANTAS ÚTILES Y SU APROVECHAMIENTO EN LA COMUNIDAD TSIMANE' DE YARANDA. A. Nate, D. Ista y V. Reyes García. CIDOB-DFID; Santa Cruz, 2001.

IS ETHNOBOTANICAL KNOWLEDGE HELD COMMUNALLY? EVIDENCE FROM BOLIVIAN AMERINDIANS. V. Reyes García, R. Godoy, V. Vadez, L. Apaza, E. Byron, T. Huanca, W. Leonard, E. Pérez y D. Wilkie, en *Science*, vol. 299, pág. 1707; 2003.



Resonancia Kondo

La espectroscopía por barrido túnel, método ideal para investigar las estructuras atómicas y electrónicas, saca a la luz la intrincada naturaleza de las superficies de cromo

O. Yu. Kolesnychenko, M. I. Katsnelson, A. I. Lichtenstein y H. van Kempen

La mayoría de los fenómenos físicos que se descubren, desde el mismo momento de su hallazgo, estimulan nuestra imaginación y nos provocan una fuerte sensación de nuevas y excitantes oportunidades. En la física del estado sólido, la superconductividad constituye un ejemplo famoso. Pero no siempre ocurre así. Un efecto que parece anodino, inciertas sus perspectivas de aplicación, carente de estímulo para seguir ahondando en él, salvo la mera curiosidad; pero, tras medio siglo de esfuerzos, el efecto se convierte en un fenómeno objeto de apasionados debates e intensa exploración científica. ¿De qué hablamos? Del "efecto Kondo".

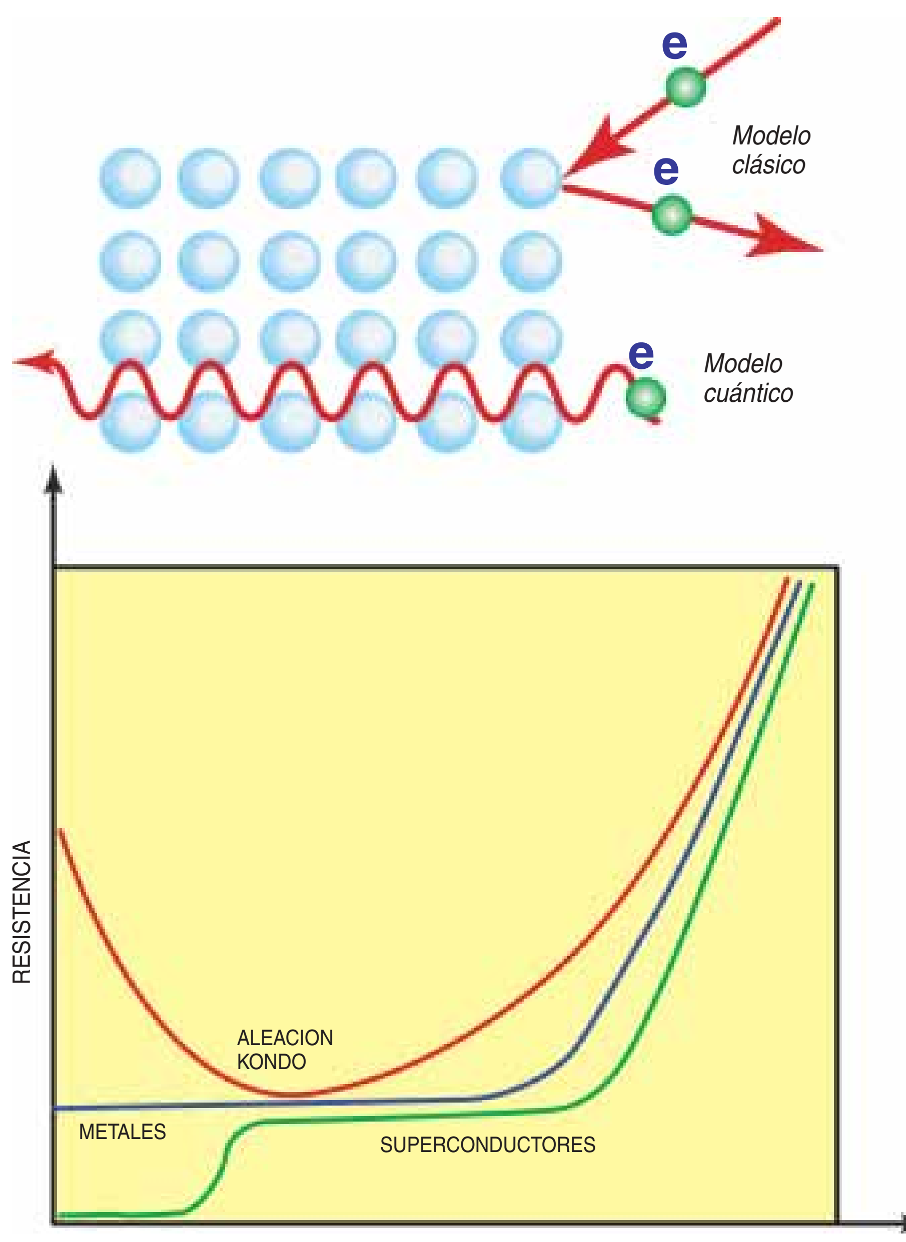
Su origen se remonta a los años treinta del siglo pasado. Afloró como resultado de mediciones rutinarias de la dependencia, con respecto a la temperatura, de la resistividad eléctrica de distintos metales por parte de G. C. van den Berg y sus colaboradores en el laboratorio Kamerlingh Onnes, en Leiden.

Por entonces, se suponía que, en un cristal perfecto y a temperatura cero, los electrones se movían con libertad, sin resistencia que se les interpusiera. Tal libertad era una consecuencia de la naturaleza cuántica del electrón, susceptible de tomarse por cuerpo material (una partícula) u onda. A ese concepto de superconductividad del electrón contribuyeron numerosos teóricos, en primer lugar Felix Bloch, físico que, andando el tiempo, recibiría el premio Nobel.

Al aumentar la temperatura, aparecen vibraciones de la red atómica, los fonones. Estos influyen en la propagación de las ondas electrónicas, cuyas trayectorias cambian al azar. Como resultado de estos procesos de dispersión electrón-fonón, así como de los de dispersión electrón-electrón, aparece una resistencia eléctrica finita, que aumenta con la temperatura.

Límite de la relación entre resistencia y temperatura

Este andamiaje teórico parecía bien asentado. Algunas veces, sin embargo, se observaba un comportamiento "anómalo". Acontecía que la resistividad eléctrica en función de la temperatura tenía un mínimo; para el caso de la resistividad del oro, por ejemplo, lo comprobó van den Berg. Aunque la anomalía no acababa de entenderse, tampoco mereció mayor atención, pese al interés que habían despertado los primeros experimentos de super-



O. YU. KOLESNYCHENKO, M. I. KATSNELSON, A. I. LICHTENSTEIN, Y H. VAN KEMPEN

1. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA en los metales. En el modelo clásico, un electrón es dispersado por átomos; en el modelo cuántico, un electrón se propaga libremente como una onda de Bloch a través de la red cristalina. La dependencia de la resistencia con respecto a la temperatura puede adoptar tres comportamientos distintivos a bajas temperaturas: un valor residual en los metales normales (*azul*), resistencia cero en los superconductores (*verde*) y un mínimo anómalo en los sistemas Kondo (*rojo*).

conductividad realizados en el mismo laboratorio Kamerlingh Onnes.

Las investigaciones experimentales acabaron por demostrar que este mínimo de la resistividad no constituía una propiedad intrínseca de los metales puros, sino que guardaba relación con la presencia de pequeñas cantidades de impurezas específicas (manganeso, hierro o cobalto). Se trataba de algo poco habitual, pues lo normal es que las impurezas a baja concentración no cambien drásticamente esa función de dependencia de la resistencia con respecto a la temperatura, sino que se ciñen a producir la llamada "resistencia residual" a temperatura cero. Aunque ese fenómeno parecía mucho menos importante que la superconductividad, en que la resistencia del metal se anula por completo a cierta temperatura de transición, resultaba harto más difícil entender la pequeña anomalía.

Jun Kondo y sus predecesores

El primer paso decisivo hacia su comprensión lo dio, en 1964, Jun Kondo. Este físico teórico japonés abordó los procesos de dispersión de electrones inducida por una determinada clase de impurezas, las magnéticas. Según la física cuántica, un electrón remeda a un imán elemental; posee espín, o rotación interna. Podemos asociarlo a una entidad dotada de carga, en rotación y en precesión en un campo magnético externo (es decir, dotado de un momento magnético). Ahora bien, el eje de rotación del espín no puede seguir una dirección arbitraria, sino que ha de hallarse en dirección paralela o antiparalela a una dirección determinada por las condiciones del experimento; se trata de los estados espín "arriba" y espín "abajo". El espín de los electrones, una de sus propiedades fundamentales, lo infirió Paul Dirac de la teoría cuántica relativista.

En los metales, estos momentos magnéticos se hallan compensados, pues cualquier estado cuántico suele estar ocupado por dos electrones con orientaciones de espín opuestas. Pero hay elementos de la tabla periódica que presentan sin compensar los momentos magnéticos de sus átomos y iones; podemos citar, entre otros, el hierro, el cobalto o el manganeso. Cuando tales átomos están diluidos en metales, pueden persistir sus momentos magnéticos, con lo que resulta una impureza magnética. En ese caso, el espín (el momento magnético) de la impureza puede tomar diferentes direcciones en el espacio. Ahora bien, la física cuántica prohíbe tener una dirección arbitraria; en la situación más sencilla habrá sólo dos posibilidades: espín arriba y espín abajo. Si una impureza magnética dispersa un electrón de conducción, ambos pueden invertir si-

Los autores

OLEKSIY KOLESNYCHENKO trabaja en el Laboratorio de Investigación de Philips en Eindhoven. MIKHAIL KATSNELSON dirige el grupo de teoría cuántica de metales del Instituto de Física de los Metales de Ekaterinburgo. ALEXANDER LICHTENSTEIN enseña ciencia de materiales computacional en la Universidad de Nimega. HERMAN VAN KEMPEN, profesor de física experimental de este último centro superior, investiga estructuras de estado sólido con microscopio túnel de barrido.

multáneamente sus espines, de suerte que se conserve el espín total.

Muchos físicos habían precedido a Kondo en el estudio de esos procesos. Sólo encontraron contribuciones menores a la resistencia residual. Sergey Vonsovsky había propuesto, en 1946, el modelo *s-f*, que describía la interacción entre los electrones de conducción y los momentos magnéticos localizados.

Sin embargo, Kondo descubrió que, si se consideraban los efectos de la dispersión de "múltiples" electrones (cuando el segundo electrón acusa el estado de la impureza magnética perturbada por el electrón anterior), la probabilidad de dispersión se incrementa al aumentar el número de electrones implicados. Expresado de una forma intuitiva: los electrones forman una nube alrededor de la impureza magnética. En virtud de ello, los electrones se mueven muy lentamente en torno a la impureza y forman una suerte de estado ligado o resonancia.

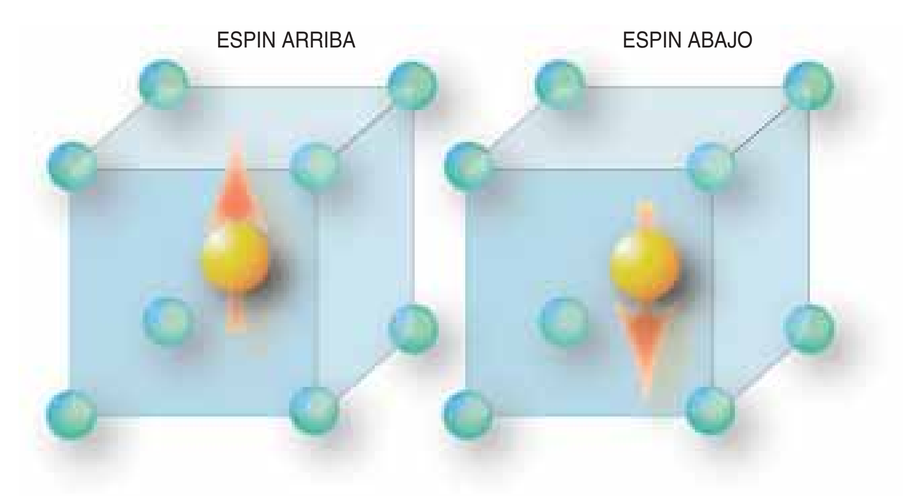
El efecto de una impureza normal, no magnética, sobre el movimiento del electrón puede compararse con un obstáculo en una calle concurrida; la obstrucción provoca que el movimiento de la muchedumbre sea más caótico. La impureza magnética vendría a ser como el policía que indujera a la gente a desfilar en movimientos más ordenados. Lo que se quiere indicar es que una impureza magnética aporta una contribución mucho mayor a la resistencia eléctrica que otra "normal".

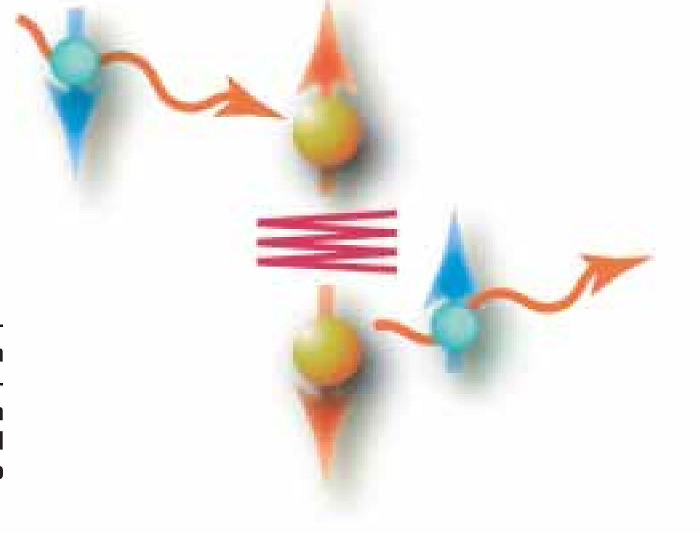
Formación de la resonancia

A temperatura cero, se forma una determinada resonancia entre la impureza magnética y el estado del sistema formado por muchos electrones de un metal. Los electrones de conducción intentan compensar, o apantallar, el momento magnético de la impureza acoplándose a ella. Esta particular resonancia entre los electrones de conducción y el espín de la impureza constituye la "resonancia Kondo", conocida también por resonancia Abrikosov-Suhl, en honor del físico ruso Alexey Abrikosov (premio Nobel 2003) y del norteamericano Harry Suhl, quienes desarrollaron la teoría de Kondo y dieron una primera descripción formal de la formación de la resonancia.

Con la elaboración ulterior de la teoría del "efecto Kondo" por parte de Phillippe Nozières, Philip Anderson, Kenneth Wilson y otros, la teoría cuántica de muchos cuerpos avanzó como quizá no lo hiciera ningún otro dominio. A finales de los setenta se disponía ya de una sólida teoría formal de la resonancia Kondo.

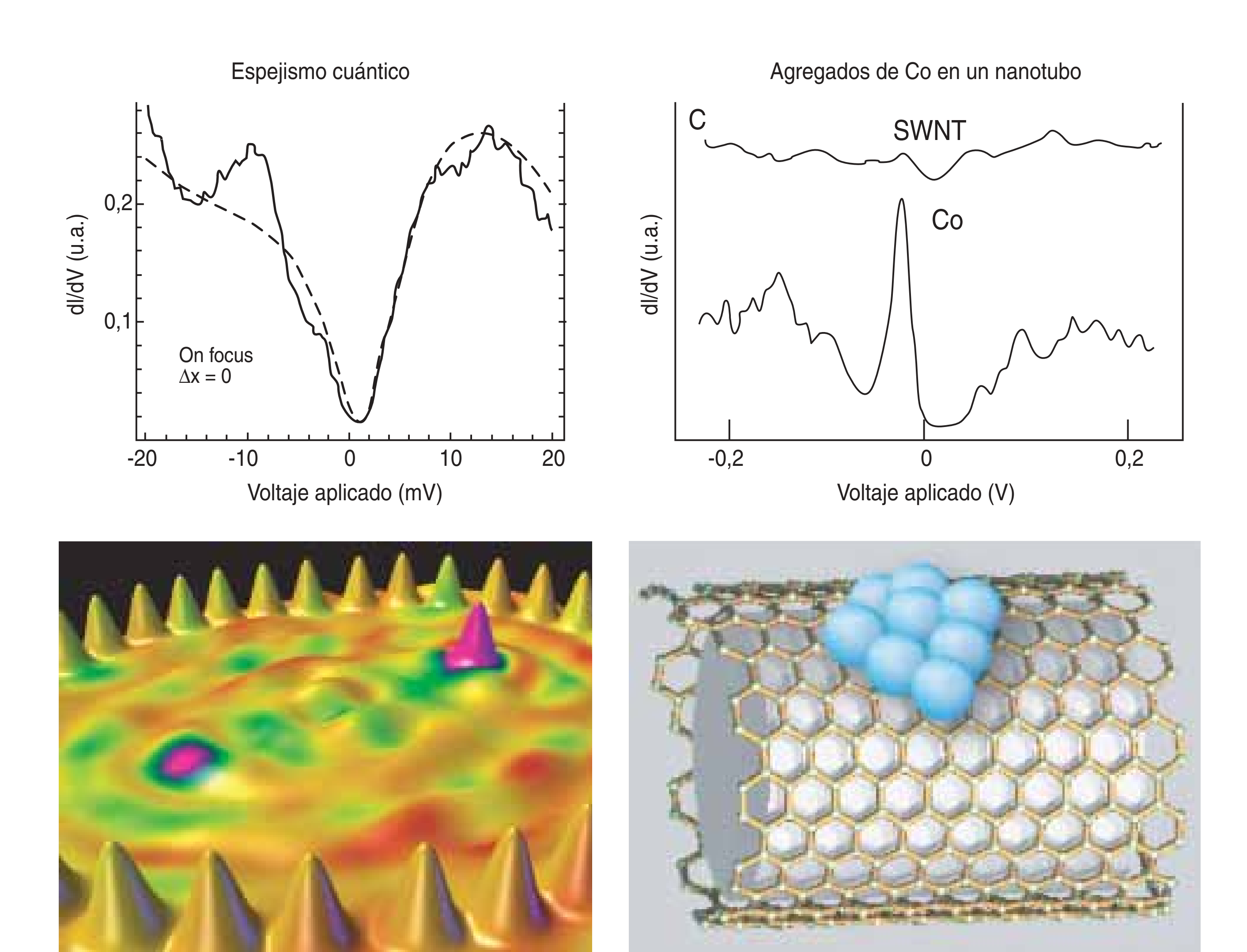
Para comprender el origen y el alcance de la resonancia Kondo, debemos recordar algunos conceptos básicos de la física de los metales. Los electrones se describen por ondas que se propagan por todo el cristal y forman los "estados de Bloch". De acuerdo con el principio de exclusión de Pauli (en homenaje





2. EL ESPIN de una impureza magnética en un metal sólo puede tener dos estados cuánticos: "espín arriba" y "espín abajo". La interacción con los electrones de conducción puede producir una dispersión con inversión de espín ("espín flip"), cuando el espín de la impureza magnética cambia el estado cuántico de "espín arriba" en "espín abajo".

O. YU. KOLESNYCHENKO, M. I. KATSNELSON, A. I. LICHTENSTEIN, Y H. VAN KEMPEN



3. LA INVESTIGACION STM DEL EFECTO KONDO por espejismo cuántico en un recinto de átomos de cobalto (*izquierda*) realizada por Don Eigler y sus colaboradores, de la compañía IBM de Almaden, y por agregados de cobalto en nanotubos de carbono (*derecha*), por el grupo de Charles Lieber, de la Universidad de Harvard. Las mediciones correspondientes de espectroscopía STM muestran una antirresonancia en el caso de espejismo cuántico y una pronunciada resonancia cerca del cero del voltaje aplicado en el caso de un agregado de cobalto en un nanotubo.

O. YU. KOLESNYCHENKO, M. I. KATSNELSON, A. I. LICHTENSTEIN, Y H. VAN KEMPEN

a Wolfgang Pauli), un estado sólo puede hallarse ocupado, a lo más, por dos electrones con direcciones de espín opuestas (espín arriba y espín abajo). En consecuencia, a temperatura cero, los electrones llenan los estados de menor energía, formándose una frontera que separa los estados ocupados de los vacíos; a esa frontera se la denomina "energía de Fermi" (en honor de Enrico Fermi).

Sólo los electrones de energía igual a la "energía de Fermi" importan en los procesos de dispersión y de formación de la resonancia. La dispersión hacia estados ocupados la prohíbe el principio de Pauli; en tales estados no hay sitio para otro electrón. Por tanto, la resonancia Kondo siempre se origina cerca de la energía de Fermi; cuando la energía de Fermi varía por la acción de una causa externa sobre el sistema, bajo presión por ejemplo, la posición de la resonancia Kondo se desplaza con ella.

Nuevas técnicas

Asistimos a un renovado interés por la física de efecto Kondo despertado por el avance registrado en la microscopía de efecto túnel de barrido (STM, de "scanning tunneling microscopy"). Gracias a la misma se han obtenido imágenes de superficies conductoras con resolución atómica, se han podido trasladar átomos y caracterizar la estructura electrónica local. En comparación con los estudios que le precedieron, en los que la física del efecto Kondo sólo se podía investigar a través de mediciones de resistencia y de susceptibilidad magnética, la técnica STM nos permite "ver" las superficies y, en consecuencia, estudiar en detalle la formación del efecto Kondo en un solo átomo magnético.

Los primeros resultados de la observación del efecto Kondo en torno a una única impureza magnética alojada en una superficie no magnética los proporcionaron, en 1998, el

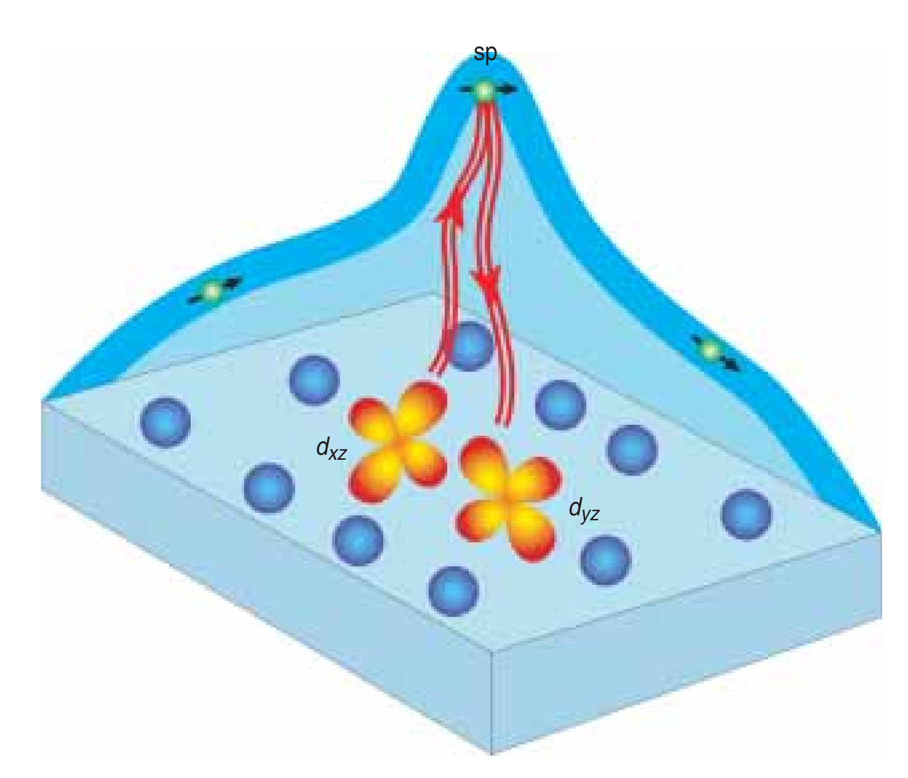
grupo de Michael Crommie, de la Universidad de Boston, y el de Wolf-Dieter Schneider, de la Universidad de Lausana. Desde entonces, la aplicación de esta técnica tan poderosa ha arrojado luz sobre cuestiones del máximo interés.

Espejismo cuántico

Sin duda, la demostración más palmaria de la naturaleza esencialmente cuántica del efecto Kondo ha sido la presentada por Don Eigler y sus colaboradores, de la compañía IBM en Almaden, con el llamado espejismo cuántico. En estos experimentos, se ha formado una elipse de átomos en torno a una impureza de cobalto, que se coloca en uno de los dos focos de la elipse. Se recurre luego al STM para medir el espectro de energía de la impureza de cobalto, lo que revela la existencia de una característica que corresponde a la resonancia Kondo. La simetría de una elipse es tal, que las ondas electrónicas que pasan por un foco convergen en el segundo, creando así una imagen especular de la resonancia Kondo. El espectro de energía medido en el segundo foco presenta, a su vez, una característica del tipo Kondo, pese a no existir impureza magnética alguna en dicho punto. Se ofrece así una demostración elegante del carácter ondulatorio del movimiento de los electrones implicados en el efecto Kondo.

Otro ejemplo interesante procede de la investigación de agregados magnéticos de cobalto en nanotubos de carbono de una sola cara. La ha acometido el grupo de Charles Lieber, de la Universidad de Harvard. Sorprendentemente, el espectro STM observado muestra un claro pico cerca del nivel de Fermi, en contraste con la antirresonancia registrada en el caso de un átomo solitario. Esta diferencia se atribuye a la hibridación de los orbitales *d* de los agregados de cobalto con los nanotubos de carbono huéspedes.

Hasta ahora, nuestra descripción del efecto Kondo se ha ceñido a tres ingredientes principales. En el caso de una impureza magnética resulta crucial la posesión de un grado de libertad interno (espín arriba y espín abajo). Además, estos dos estados tienen exactamente la misma energía; se sabe que un campo magnético externo que opere sobre el espín de la impureza destruye la "degeneración de la energía" y suprime la resonancia Kondo. Por último, aunque no menos importante, hay procesos de dispersión electrónica que se acompañan de un cambio del estado interno de la impureza magnética: procesos de inversión de espín ("espín flip").



4. EFECTO KONDO ORBITAL en una superficie de Cr(001). Debido a la interacción con los electrones de conducción (*verde*), el orbital d_{xz} se invierte en d_{yz} y forma la resonancia Kondo orbital.

Puntos cuánticos

Conviene subrayar, sin embargo, que podemos considerar la formación de un efecto Kondo para *cualquier* centro de dispersión dotado de un grado de libertad interno y con degeneración de la energía. Sírvanos de ejemplo la participación de grados de libertad orbitales (no de espín) en la formación de una resonancia Kondo, investigada a través de mediciones de conductancia en los llamados puntos cuánticos, que son pequeñas partículas de semiconductor. Estas partículas, conocidas también por átomos artificiales, pueden contener algunos electrones, cuya cifra exacta depende del voltaje de un electrodo en la vecindad de la partícula, el electrodo puerta.

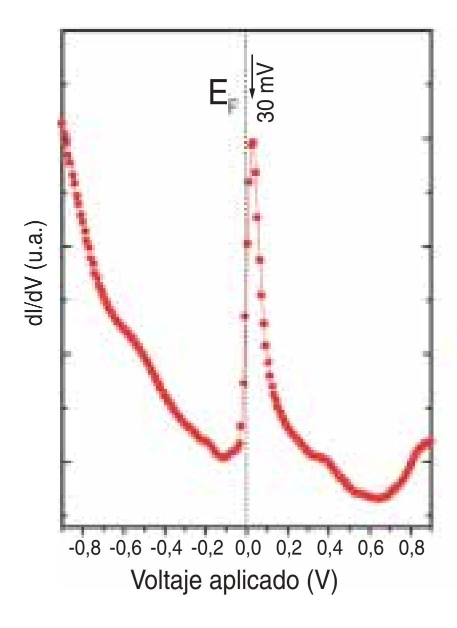
Si un punto cuántico tiene un electrón, o un número impar de ellos, presentará un espín sin compensar; se comportará como un átomo magnético, con la posibilidad de que surja el efecto Kondo "de espín". Ello no obstante, los grupos de Leo Kouwenhoven y de Goldhaber-Gordon han demostrado que también en el caso de un número par de electrones en el punto cuántico se puede formar el efecto Kondo; ocurre así merced a la degeneración de complejos estados de espín y de estados orbitales. Se abre de ese modo una puerta para investigar el alcance del efecto Kondo en el dominio de la nanoelectrónica.

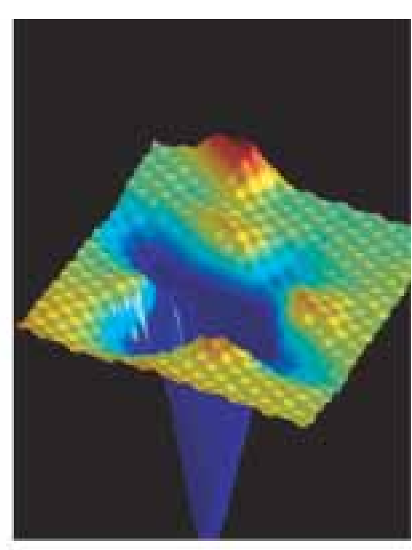
Vidrios metálicos

En los metales amorfos, los llamados vidrios metálicos, encontramos otro ejemplo sugestivo. A diferencia de los cristales, los

O. YU. KOLESNYCHENKO, M. I. KATSNELSON, A. I. LICHTENSTEIN, Y H. VAN KEMPEN

5. IMAGEN STM EN EL ESPACIO REAL de la resonancia en la superficie Cr(001). La aguda resonancia en el espectro STM de la estructura electrónica superficial del cromo se muestra a la izquierda. A la derecha, una imagen STM en la que se aprecia una huella cruciforme de la simetría orbital de la resonancia Kondo observada.





O. YU. KOLESNYCHENKO, M. I. KATSNELSON, A. I. LICHTENSTEIN, Y H. VAN KEMPEN

vidrios no presentan una configuración atómica con una energía más baja que cualquier otra configuración. Por el contrario, hay muchas configuraciones atómicas dotadas de energía similar. En particular, en algunos grupos atómicos las configuraciones con un átomo en una posición "izquierda" y en una posición "derecha" resultan equivalentes energéticamente. Cuando esto ocurre, el sistema puede adoptar una u otra configuración indistintamente. Esta libertad del átomo para hallarse en la posición derecha o izquierda cumple el mismo papel que la libertad del espín de una impureza magnética para hallarse dirigido hacia arriba o hacia abajo.

De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, el átomo en cuestión puede ir, "tunelear" si optamos por el barbarismo, de la posición izquierda a la derecha y viceversa; lo que revela la existencia de grados de libertad internos de tipo "pseudoespín": posición izquierda ("pseudoespín" hacia abajo), posición derecha ("pseudoespín" hacia arriba).

En esta situación cabe la posibilidad de un análogo del efecto Kondo. Del mismo se ocuparon el propio Jun Kondo y Alfred Zawadowsky. Por su parte, Daniel Cox, de la Universidad de California en Davis, estudió otra clase de efecto "pseudo-Kondo" en compuestos basados en uranio. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con el efecto Kondo de espín, las pruebas experimentales del comportamiento "pseudo-Kondo" no acaban de ser concluyentes.

Dejando de lados las dificultades experimentales, el efecto "pseudo-Kondo" postulado se enfrenta a un problema conceptual básico. Sin campo magnético externo, la degeneración de la energía de los estados de espín arriba y espín abajo de las impurezas magnéticas necesarias para el efecto Kondo constituye una propiedad exacta del sistema que está garantizado por sus propiedades de simetría. Para los grados de libertad orbitales, esta degeneración es sólo una propiedad accidental. Pensemos en los vidrios metálicos. En este caso, es obvio que sólo una muy pequeña fracción de todas las configuraciones atómicas puede ser apropiada para el efecto "pseudo-Kondo". Resulta más plausible un efecto "Kondo exótico" cuando se trata de átomos y moléculas en los que puede lograrse la degeneración orbital controlando factores externos (por ejemplo, el campo magnético en determinados puntos cuánticos), o en el caso de sistemas cuánticos en los que los grados de libertad orbitales se hallan intrínsecamente degenerados.

Resonancia Kondo orbital

En nuestro Laboratorio de la Universidad de Nimega en Holanda nos propusimos abordar el efecto Kondo orbital en una superficie metálica. La superficie de un metal de transición, en particular la Cr(001), tiene dos estados localizados, d_{xz} y el d_{yz}. Los estados superficiales constituyen una propiedad intrínseca de la superficie metálica; su simetría espacial en la superficie (001) protege la degeneración porque, para dicha superficie, los ejes x e y son indistinguibles.

El estado d_{xz}, al estar hibridado con las bandas de conducción electrónicas, se convierte en el estado d_{yz} vía excitaciones virtuales de muchos cuerpos, y al revés. En nuestro objeto de trabajo nos encontramos, pues, con inversiones orbitales, en vez de inversiones de espín. Estas inversiones orbitales conducen, de nuevo, a la formación de una resonancia de muchos electrones en la energía de Fermi, la resonancia Kondo orbital, en perfecta analogía con el efecto Kondo normal.

Para explorar esta excitante posibilidad de existencia de una tal resonancia Kondo orbital en una superficie de un metal de transición, recurrimos a la microscopía de efecto túnel de barrido y a la espectroscopía. En nuestra labor, a diferencia de cuantos habían estudiado sistemas Kondo orbitales, logramos alterar la degeneración de los estados. Obtuvimos así una valiosa información desconocida sobre el efecto Kondo orbital.

Para analizar la posibilidad de la física del efecto Kondo orbital en Cr(001) necesitamos una superficie ultralimpia, que pueda ser investigada mediante la técnica STM a temperaturas extremadamente bajas; en este caso 4,2 kelvin, correspondiente a la temperatura del helio líquido. La limpieza del cromo por el mé-

todo tradicional de bombardeo y calentamiento se convierte en una tarea hercúlea; requiere meses de ciclos y ni siquiera entonces se consigue una superficie atómicamente limpia y ordenada. Por ese motivo, ideamos un nuevo método que nos proporcionara superficies Cr(001) de la calidad exigida a la temperatura del helio líquido. Aprovechando la escasa fragilidad del cromo, hemos roto *in situ* un cristal solo, obteniendo superficies (001) atómicamente planas y limpias.

El espectro de energías típico medido por STM en la superficie Cr(001) atómicamente limpia muestra una estrecha resonancia cerca del nivel de Fermi. Para poner de manifiesto la simetría orbital de esta resonancia, se controla la supresión del estado superficial por una impureza. Tal impureza única destruye localmente la resonancia; con la sonda STM a escala atómica puede visualizarse el carácter del estado en cuestión y su simetría espacial, lo que constituye una indicación de los estados orbitales implicados. Teniendo en cuenta la simetría del rasgo cruciforme observado, podemos concluir que el estado superficial correspondiente a la resonancia registrada tiene la mezcla adecuada de los orbitales d_{xz} y d_{yz}.

La degeneración de los estados cuánticos de un centro dispersor resulta determinante para la existencia del efecto Kondo. En el caso de la resonancia Kondo orbital, la degeneración protegida por la simetría superficial puede destruirse en un escalón bien definido. Nuestros resultados experimentales muestran una supresión de la resonancia Kondo al acercarnos a un escalón. En el marco del modelo Kondo orbital, la influencia de un escalón monoatómico debería asemejarse a la influencia ejercida por un campo magnético débil sobre la resonancia Kondo de espín tradicional.

Esta investigación de las superficies de los metales de transición nos ofrece un ejemplo más de un sistema Kondo en el que los grados de libertad orbitales desempeñan una función crucial. Con independencia de lo que pueda resultar más adelante de investigaciones de sistemas similares, podemos ya afirmar que tal física del efecto Kondo exótico constituye un campo en rápido desarrollo, con un enorme potencial de convertirse, por lo menos, en un dominio tan importante y ampliamente estudiado como el de los sistemas Kondo de espín tradicionales.

En conclusión, la historia del efecto Kondo continúa. Quedan muchas páginas por escribir, pues no debemos olvidar su participación en cuestiones fundamentales, que van desde los complejos sistemas de muchos cuerpos multiorbitales hasta los dispositivos de nanopartículas y los transistores de espín, esperanza de las nuevas técnicas que se avecinan.

Bibliografía complementaria

MICROSCOPIOS CON SONDA DE BARRIDO. H. Kumar Wickramasinghe, en *Investigación y Ciencia*, págs. 28-36, diciembre, 1989.

LOS ELECTRONES EN PLANILANDIA. Steven A. Kivelson, Dung-Hai Lee y Shou-Cheng Zhang, en *Investigación y Ciencia*, págs. 54-60, mayo, 1996.

TUNNELING INTO SINGLE MAGNETIC ATOM. V. Madhavan, W. Chen, T. Jamneala, M. F. Crommie y N. S. Wingreen, en *Science*, volumen 280, página 567; 1998.

QUANTUM MIRAGES FORMED BY COHERENT PROJECTION OF ELECTRONIC STRUCTURE. H. C. Manoharan, C. P. Lutz y D. M. Eigler, en *Nature*, vol. 403, pág. 512; 2000.

REVIVAL OF THE KONDO EFFECT. L. Kouwenhoven y L. Glazman, en *Physics World*, pág. 33, enero 2001.

ESPINTRÓNICA. David D. Awschalom, M Michael E. Flatté y Nitin Samarth, en *Investigación y Ciencia*, págs. 50-57, agosto, 2002.

REAL-SPACE IMAGING OF AN ORBITAL KONDO RESONANCE ON THE CR(001) SURFACE. O. Yu. Kolesnychenko, R. de Kort, M. I. Katsnelson, A. I. Lichtenstein y H. van Kempen, en *Nature*, vol. 415, pág. 507; 2002.

Vuelo con alas flexibles

La técnica vuelve a dirigir su mirada a la naturaleza. El vuelo de los futuros aviones podría remedar mejor el de las aves, adaptando la geometría de las alas a las variaciones de las condiciones de vuelo

Steven Ashley

Estén en vuelo o posados en tierra, los aviones ofrecen siempre el mismo aspecto. En su mayoría, las alas se extienden desde el fuselaje bajo un ángulo fijo y su rigidez garantiza, para la tranquilidad de tripulantes y pasajeros, un trayecto sosegado. En el futuro, sin embargo, podría cambiar el panorama aeronáutico con los diseños que se están gestando. Por ejemplo, las alas mórficas, estructuras avanzadas que configurarán automáticamente sus formas y texturas de superficie para adaptarlas a los cambios operados en las condiciones de vuelo. Tal capacidad remedará los ajustes, sutiles e instantáneos, que las aves realizan por instinto en sus alas, colas y plumas cuando vuelan.



RICHARD SNYDER *Base Wright-Patterson de las fuerzas aéreas AFRL*

1. LOS MODELOS COMPUTACIONALES facilitan la simulación del comportamiento aerodinámico y aeroelástico de las alas flexibles de un Hornet F/A-18A modificado. En este ejemplo, las superficies de control del borde de ataque exterior se inclinan 10 grados hacia abajo mientras el avión vuela a una altura de 3000 metros a Mach 0,9 (es decir, 0,9 veces la velocidad del sonido en esas mismas condiciones atmosféricas). Los colores muestran las variaciones en las presiones superficiales: cuanto más cálido, más presión. La zona transparente indica dónde el flujo de aire local llega a la misma velocidad que las ondas acústicas, o Mach 1.

Las alas mórficas se ajustarán a la forma que mejor se adapte a su función y a cada maniobra. Los aviones de combate de próxima generación podrían cernerse durante horas sobre su objetivo valiéndose de unas alas alargadas y baja resistencia. Llegado el momento de disparar o arrojar la carga, las alas se retraerían y se plegarían a la manera de un telescopio, preparando el avión para un rápido ataque. De manera similar, los aviones de aerolíneas podrían transformar sus alas durante el vuelo para ahorrar combustible o llegar antes a destino.

Pero estos aviones tan flexibles son, hoy por hoy, una utopía. Requieren materiales y mecanismos para los que ni siquiera existen muestras ni prototipos. Sin embargo, hay ya en fase de prueba un precursor de esos vehículos. Se basa en las fuerzas aerodinámicas generadas por las alas de sustentación y superficies de control de vuelo para lograr que unas menos robustas y más ligeras giren en vuelo a fin de obtener un rendimiento óptimo. Estas alas flexibles suponen un paso adelante en la aviación, si bien, en cierto sentido, también un paso atrás.



2. LA TORSION DE LAS ALAS de este planeador de los hermanos Wright de 1911 actúa aumentando la sustentación en uno de sus lados, con lo que el piloto puede balancear el aparato. Esa técnica pionera de alabeo siguió empleándose hasta que las crecientes velocidades de vuelo requirieron unas estructuras alares más robustas y rígidas.

BETTMANN/CORBIS

Regreso al futuro

Al montar en bicicleta, lo primero que hay que aprender es a mantener el equilibrio en cualquier tipo de maniobra. Ese principio regía también para los pilotos de los primeros aviones.

Mucho antes de empezar a construir modelos de planeadores, Wilbur y Orville Wright se dieron cuenta de que no conseguirían controlar el vuelo a menos que dieran con la manera de regular la estabilidad lateral en el aire. En particular, necesitaban dominar los movimientos de balanceo, las rotaciones en torno al eje longitudinal del aeroplano. Sólo el control de los momentos de balanceo permitiría a un piloto mantener una trayectoria horizontal o ladear un plano para virar.

Resumen/*Transformación de las alas*

- Observando el vuelo de las aves y los cambios producidos en sus alas, los hermanos Wrigth desarrollaron unas alas para avión flexibles. Se valieron de cables y poleas para modificar la sustentación y controlar así el balanceo. Con el tiempo, y a medida que aumentaron las velocidades, se adoptaron alas rígidas que soportaran mejor las tensiones aerodinámicas resultantes. En esas alas, la diferencia de sustentación que se requiere para balancear el avión se conseguía mediante alerones.
- En ingeniería aeronáutica se investiga ahora el modo de aprovechar las fuerzas generadas por las estructuras abatibles (“flaps”) del borde de ataque para torcer unas alas flexibles y ligeras, que mejorarían las prestaciones de los aviones.

En 1900, Wilbur observó que, cuando una racha de aire tumba a un buitre, éste recupera el equilibrio lateral mediante la torsión de las puntas de las alas. Cuando se retuerce la punta de un ala, el ángulo de ataque, que mide la inclinación del avión respecto a la dirección del viento, se modifica, aumentando o disminuyendo la sustentación. Este cambio redistribuye las fuerzas sustentadoras a lo largo de toda la envergadura. Igual que un ciclista desplaza su peso para recuperar la posición de una máquina que se tambalea, mantener el equilibrio de las fuerzas sustentadoras que actúan en la punta de cada ala resulta clave para controlar el balanceo de un avión. En su momento, Wilbur concibió un elegante mecanismo de cables y poleas que retorcía de un extremo a otro un ala de tejido flexible. Mientras un ala ganaba sustentación, la otra la perdía. La diferencia de fuerzas inclinaba el avión

hacia el costado de menor sustentación. Así nació el concepto de alabeo del ala.

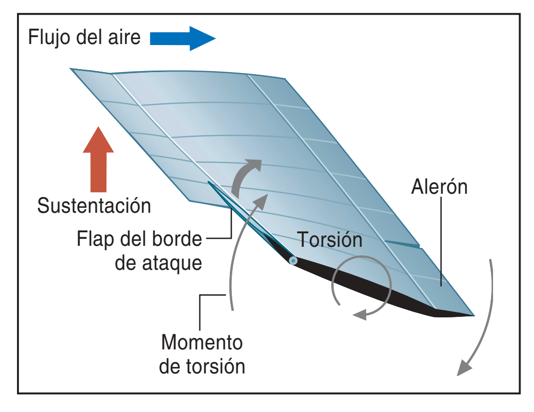
Aunque las técnicas de alabeo se siguieron aplicando durante muchos años (así, en el Bleriot XI y otros monoplanos primitivos), el aumento incesante de la velocidad de vuelo terminó por obligar a reforzar las estructuras alares para potenciar su resistencia. La rigidez de los montantes y costillas dio como resultado unas alas poco flexibles a la torsión. Para compensar esa pérdida de movilidad, se instalaron alerones en los bordes externos de las alas. Esas superficies abatibles desviaban el flujo del aire para modificar la sustentación, brindando así un control del balanceo. La mayoría de los fabricantes no tardaron en arrinconar las alas flexibles. El alabeo sólo se ha seguido usando en máquinas lentas y ligeras, incluidos los aeromodelos y los aviones a pedales como el Gossamer Albatross de 1979 que cruzó el Canal de la Mancha.

Tras los primeros decenios de la aviación, la flexibilidad de las alas dejó de resultar beneficiosa para convertirse en un inconveniente. Por una razón fundamental: las enormes presiones aerodinámicas producidas en los vuelos a gran velocidad provocaban torsiones enojosas en las alas con alerones. A bajas velocidades, las fuerzas de torsión inducidas por el flujo del aire limitan la capacidad del piloto para inclinar el avión lateralmente, pues la torsión de las alas disminuye el flujo de aire que los alerones pueden desviar. A grandes velocidades, el aumento de la flexión de los extremos de las alas puede ocasionar una inversión de los mandos, fenómeno de fatales consecuencias. En el curso del mismo, el piloto acciona la palanca de mando para balancear el aparato en un sentido pero la maniobra resultante es exactamente la contraria. Ello se debe a que las alas flexibles producen un momento de balanceo opuesto al aplicado por las superficies de control y mayor que el mismo.

En consecuencia, las alas de los aviones recientes se han construido por lo general más robustas y rígidas que las de comienzos del siglo XX. Pese a ofrecer buenas prestaciones aerodinámicas y de sustentación, las alas largas, esbeltas y ligeras tampoco se utilizan. Por similar razón: se teme que su estructura interna sufra tensiones excesivas. En el pasado, el problema de la torsión se resolvió eliminándola.

VUELO CON ALAS FLEXIBLES

AVION EXPERIMENTAL con el borde de ataque basculado hacia abajo.



LOS VUELOS DE EVALUACION del ala activa aeroelástica de este Hornet F/A-18A remodelado empezaron en noviembre de 2002 en el Centro de Investigaciones de Vuelo Dryden de la NASA. Se trata de un avión experimental, en cuyo proyecto intervinieron la NASA, el Laboratorio de la Fuerza Aérea de EE.UU. y los Talleres Phantom de Boeing. Utiliza la inclinación de los segmentos alares ("flaps") del borde de ataque para retorcer el ala y controlar mejor el balanceo. El modelo de pruebas corresponde al caza F/A-18A McDonnell Douglas de comienzos de los años ochenta del siglo pasado. El Hornet prototipo se caracterizaba por su deficiente balanceo a alta velocidad, debido a unas alas excesivamente flexibles. Con el programa de ala activa aeroelástica (AAA), el ala rígida del prototipo volvió a su estado original, más adaptable, para facilitar el control del alabeo. La nueva técnica debería aumentar la maniobrabilidad del avión.

En el diagrama de la izquierda se muestra el mecanismo de maniobra de un avión basado en la técnica AAA. Para enderezar el aparato, el ala izquierda se retuerce de modo que su borde delantero se eleve al bascular hacia arriba el segmento alar del borde de ataque exterior. Inclinando hacia abajo el flap del borde ataque del ala derecha se aumenta la fuerza de balanceo. Adviértase que los alerones rotan para reforzar la torsión.

CARLA THOMAS NASA (*fotografía*); SAMUEL VELASCO (*ilustración*)

ALAS CONVERTIBLES

EL HALCON PEREGRINO aprieta las alas contra el cuerpo cuando se lanza en picado, a una velocidad respetable, sobre su presa. En su vuelo de "crucero", la rapaz despliega las alas en toda su extensión para ahorrar energía. A los ingenieros aeronáuticos les agradaría imitar este tipo de transformaciones para lograr mejores prestaciones de vuelo. Sueñan con un avión revolucionario cuyas alas cambien de forma para aprovechar al máximo las condiciones de vuelo.

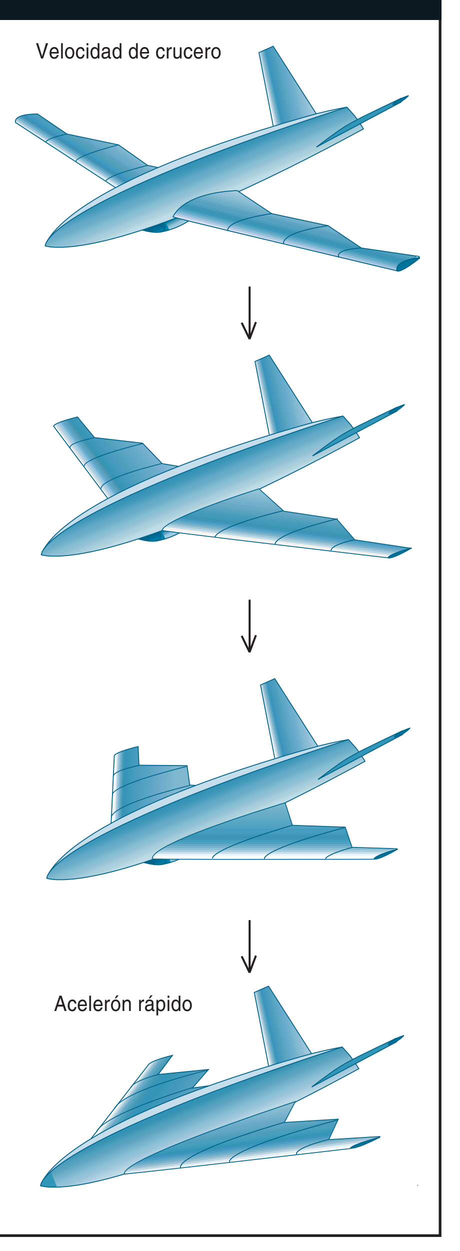
En la NASA se investiga en torno al avión mórfico (*abajo*), cuya realidad fechan en el año 2030. Prevén una máquina capaz de responder ante los cambios de las condiciones de vuelo mediante unos sensores que, imitando los nervios sensoriales de las aves, captarán las variaciones de presión en toda la superficie alar. Estos sensores generarán movimiento a través de actuadores que, como los músculos del ala de un pájaro, optimizarán el perfil alar.



REPRESENTACION artística de un avión de ala mórfica

En los vuelos a gran velocidad, las alas se replegarían hacia atrás para reducir la resistencia del aire y aplacar el estallido sónico. También podrían adaptarse las admisiones y las toberas de los motores. Con pequeños chorros de aire y superficies de control plumiformes proporcionarían fuerzas de control adicionales durante las maniobras extremas y aumentarían la seguridad. Para pasar a la configuración de baja velocidad, las alas mejorarían el rendimiento desplegándose y aumentando en grosor y envergadura. En vez de una cola vertical, el vehículo podría emplear impulsores de chorro dirigible. Al preparar un aterrizaje, las puntas de las alas se dividirían para controlar mejor los vórtices de punta de ala que tanta energía consumen, mientras que las alas se alargarían para facilitar una carrera de aterrizaje más corta sobre la pista. Para conseguir mayor sustentación y un control adicional, se desplegaría una cola.

La creación de un ala mórfica a corto plazo constituye el objetivo de un programa patrocinado por la norteamericana Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para Defensa. Uno de los contratistas principales, NextGen Aeronautics, está trabajando en un avión capaz de transformar una configuración en modo crucero de baja velocidad en otra de acelerón rápido y viceversa (*derecha*).



Alas elásticas

Un mayor conocimiento de la aerodinámica combinado con la electrónica y los materiales de la era espacial ha incitado a reconsiderar las ventajas de la flexibilidad para los aviones de altas prestaciones. El gobierno de EE.UU. y la industria aeronáutica han unido sus fuerzas para reducir la rigidez de las alas del cazabombardero de la serie Hornet F/A-18A, transformándolo en el primer avión moderno dotado de alas que se pueden torcer. En 2002 se ensayó el aparato a gran altura sobre los lagos resecos del desierto californiano de Mojave. Nuevos ensayos en los próximos años servirán para determinar las ventajas que ofrecen las alas flexibles, o aeroelásticas. Se pretende demostrar, por ejemplo, la capacidad de los flaps alterados del borde de ataque de las alas del F/A-18 para generar momentos de torsión. En principio, el control de las alas del borde anterior permitirá torcer la estructura alar entera lo suficiente para balancear el Hornet a gran velocidad, obteniendo un rendimiento mayor que con sus alas de serie. En el proyecto del ala aeroelástica activa (AAA) participan varias instituciones estadounidenses: la Armada, el Laboratorio de Investigaciones del Ejército del Aire, el Centro de Investigaciones de Vuelo Dryden de la NASA y los Talleres Phantom de Boeing.

Mantener la flexibilidad

Hace un cuarto de siglo, al realizarse las primeras pruebas del F/A-18, el prototipo tuvo problemas con los balanceos a gran velocidad porque las alas se retorcían demasiado. Los pilotos perdían el control hasta producirse la inversión

NASA (*image*); SAMUEL VELASCO (*illustration*)

del mando de los alerones. David Riley, director del programa AAA en Boeing, recuerda que la dificultad surgía de la inexperiencia de los ingenieros con los nuevos materiales compuestos ligeros que sustituyeron a los metales en la estructura alar. El F/A-18 constituyó la primera gran incursión de la industria aerospacial en la aplicación estructural de materiales compuestos poliméricos, si bien los resultados no respondieron a las expectativas en cuanto a rigidez a la torsión.

Tras este intento fallido, las alas flexibles se abandonaron, sustituidas por un nuevo diseño. Incorporaron costillas más robustas y revestimientos más gruesos y rígidos, pero tal aumento de peso repercutió en las prestaciones del avión. Asimismo, añadieron la cola de balanceo, una combinación del plano horizontal móvil (estabilizador) y el timón de altura que la mayoría de reactores de caza de gama alta emplean para dominar mejor el balanceo cuando las presiones dinámicas resultan elevadas. En resumidas cuentas, al avión le fallaron las alas durante los últimos 25 años.

Sin embargo, lo que en los años ochenta se consideraba inaceptable en un reactor de caza de primera línea se nos revela ahora ideal para la aerodinámica experimental. Los miembros del proyecto AAA comprendieron que podían sacar partido de las minusvalías de las primeras alas flexibles del F/A-18. Además, disponían de unas buenas condiciones para empezar a trabajar: la Armada estaba dispuesta a donar el aparato, las alas del prototipo aún se conservaban (se ahorraban el gasto de diseñar otras nuevas), la estructura del avión ya se había sometido a pruebas en el aire y existían abundantes datos de control de vuelo del F/A-18 recogidos durante investigaciones precedentes.

El F/A-18 está dotado de mecanismos de pliegue de las alas que le permiten ahorrar espacio en cubierta cuando opera en portaaviones. En vez de un ala longilínea presenta varios segmentos alares ("flaps"). Aunque los segmentos interiores y exteriores del ala de serie del Hornet actúan al unísono, pueden modificarse para que funcionen independientemente, lo cual resulta clave para el vuelo con alas aeroelásticas.

El esquema del proyecto AAA se debía a una idea avanzada en 1983 por Jan Tulinius, de Rockwell International, compañía que acabó fusionada con Boeing. Su propuesta resultaba así de sencilla: si no podemos evitar que las alas se retuerzan ¿por qué no intentamos que lo hagan a nuestro favor? Entre 1984 y 1988, esta nueva estrategia se ensayó en el túnel de viento, con resultados positivos.

Dos observaciones fundamentales subyacen tras el concepto de AAA. En primer lugar, un ala rígida pesa más que otra flexible, pues la rigidez se consigue con refuerzos. En segundo lugar, un ala flexible crea una mayor fuerza de balanceo que los alerones normales, por la sencilla razón de que ofrece una mayor superficie para desviar el flujo del aire. Si se emplea la energía del flujo del aire para controlar a la vez la torsión y el alabeo, se espera conseguir mejores prestaciones. Estas alas requerirían menos partes móviles para controlar el vuelo; por tanto, podrían construirse menos gruesas, más ligeras y más eficientes aerodinámicamente que las actuales, brindando así más autonomía, capacidad de carga y ahorro de combustible. Sorprendentemente, puede que un ala activa aeroelástica se retuerza menos, durante su operación, que otra ala normal.

Se estima que las nuevas alas flexibles van a suponer un alentador aligeramiento para la aeronáutica. Sobre el papel, las AAA podrían reducir, entre un 7 y un 10 por ciento, el peso de un caza transónico (avión que vuela cerca de la velocidad del sonido); en un 18 por ciento, el de un caza supersónico avanzado. Asimismo, permitirían eliminar las superficies de los planos de cola inductores de resistencia aerodinámica y reflectores de radar, pues las alas aeroelásticas asumirían sus funciones.

Torsión

Tres años invertidos en el diseño y pruebas en tierra en las instalaciones Dryden de la NASA precedieron a los primeros vuelos del nuevo Hornet. En los Talleres Phantom de Boeing, modificaron las alas del avión de prueba F/A-18: con actuadores (generadores de movimiento), una ala de borde de ataque dividida y unos revestimientos alares más finos. Estas modificaciones permitían a los paneles del ala exterior retorcerse hasta cinco grados, mucho más de lo normal.

La clave para conseguir un buen alabeo consiste en vigilar con atención las tensiones aerodinámicas y anularlas inmediatamente tras ser detectadas. Por las alas y el fuselaje se distribuyen un par de centenares de sensores para observar la carga estructural en vuelo. Empleando las superficies de control (segmentos alares, alerones y demás) se redistribuyen las cargas de torsión del ala para evitar cualquier sobrecarga. Sin esa mitigación, la fatiga de los materiales dañaría la estructura antes de tiempo.

A partir de los datos recogidos durante los vuelos preliminares de principios de 2003 se han elaborado directrices para optimizar el aprovechamiento de la aeroelasticidad de las alas. Las superficies se activaron una por una para evaluar sus efectos. Se midieron las prestaciones del ala y su respuesta estructural a distintos grados de flexión. El borde de ataque, por ejemplo, se estudió desde tres grados positivos (arriba) hasta tres grados negativos (abajo). Por fin, pilotos expertos sometieron al aparato a maniobras de combate de gran brusquedad para someter a prueba la técnica.

Mediante la observación de la maniobrabilidad y las mediciones de la carga aeroelástica durante los vuelos de prueba, se modelan los fenómenos dinámicos asociados a las alas flexibles. A partir de esa información, se elaboran reglas de pilotaje y mandos computerizados de acción rápida que mejoran el vuelo y evitan efectos adversos.

En las próximas pruebas de vuelo, programadas para la primavera y el verano del presente año, se planea demostrar los efectos aeroelásticos en las alas de nuevo cuño. Se espera superar las velocidades de balanceo que el F/A-18 de serie alcanza sin recurrir a su cola

ALAS BATIENTES

LOS ENTUSIASTAS DEL VUELO con ala batiente del Instituto de Estudios Aeronáuticos de la Universidad de Toronto emplean una estructura de alas flexibles para hacer realidad el más antiguo de los sueños de la aeronáutica: volar como las aves, literalmente. Desde 1995 y con escasa financiación, un grupo de estudiantes encabezado por el profesor de aeronáutica James DeLaurier trabaja para que su ornitóptero levante el vuelo (*fotografía*).

Resulta clave en su máquina voladora un ala "flexocizallante", idea innovadora concebida por Jeremy M. Harris, colaborador de DeLaurier, a quien conoció en 1973 cuando ambos trabajaban en el Instituto Memorial Battelle, en Columbus. Hacia 1976, los dos habían comenzado a considerar la interrelación entre el perfil de la sección de una superficie aerodinámica y su libertad para cambiar el ángulo de ataque sobre el flujo de aire.

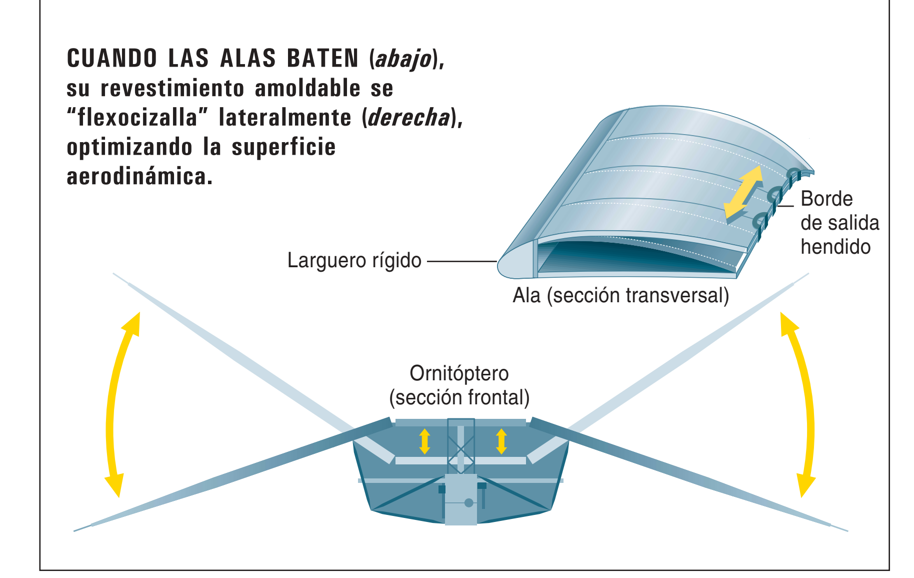
En un ornitóptero, el movimiento que permite modificar el ángulo de ataque de las secciones del ala externa es una torsión lineal con la que el ángulo de ataque nunca supere en ninguna parte del ala el valor crítico a partir del cual se perdería sustentación. Esta torsión debe coordinarse con el batir alar: el ala pasa de torsión positiva a negativa, y a la inversa, en cada ciclo. La dificultad principal consistía en conseguir un movimiento tan complejo con una estructura alar clásica.


ORNITOPTERO

En 1979, reflexionaron sobre un hecho harto conocido: si se le hiende longitudinalmente, un tubo circular pierde buena parte de su rigidez a la torsión. Cuando un tubo hendido se desliza sobre un árbol de soporte y se somete a torsión, los bordes enfrentados de la hendidura se deslizan suavemente uno respecto a otro con un efecto de cizalla. La solución propuesta por Harris consistió en convertir el tubo cilíndrico hendido en un ala, de modo que la hendidura coincidiera con el borde de salida de una superficie aerodinámica "hueca" con revestimiento amoldable (*diagrama*).

Los ensayos subsiguientes mostraron la validez del ala flexocizallante: el ángulo de ataque de la superficie aerodinámica varía sin perder la sustentación merced a la hendidura del borde de salida, que permite

CUANDO LAS ALAS BATEN (*abajo*), su revestimiento amoldable se "flexocizalla" lateralmente (*derecha*), optimizando la superficie aerodinámica.



de balanceo. Si se consigue, estos ensayos constituirán una buena referencia para el diseño de los aviones de próxima generación. Cuando las velocidades aumentan hasta el punto en que las superficies del borde de salida normales (alerones) resultan inútiles, las superficies del borde de ataque empiezan a retorcer el ala. Cabe también la posibilidad de utilizar la retroacción para suprimir el flameo de las alas, una peligrosa reacción a las fuerzas aerodinámicas que se agudiza con rapidez. Un sistema digital de aprendizaje inspirado en las redes neuronales constituiría una buena herramienta para detectar el problema desde el comienzo y así contrarrestarlo.

El concepto de ala activa aeroelástica puede aplicarse no sólo a los vuelos supersónicos sino a una amplia variedad de aparatos actualmente en estudio como, por ejemplo, los aviones de alta cota, largo alcance, gran autonomía, observación y ataque, autónomos o tripulados. Las alas elásticas podrían hallar asimismo aplicación en aviones comerciales.

Las alas del futuro

El proyecto AAA constituye el primer paso en un largo camino hacia un ala mórfica, capaz de percibir el entorno y adoptar la forma que le permita desarrollar un comportamiento óptimo en una amplia gama de condiciones de vuelo. La estructura alar de aterrizaje y los sistemas de hendidura frontal reforzadores de la sustentación de los aviones modernos, así como las alas basculantes del F-14 Tomcat y el F-111 Aardvark, aportan capacidad de reconfiguración en vuelo. Pero esas técnicas e incluso el ala activa aeroelástica se quedan cortas ante lo que se tiene en mente para el futuro. Los diseños de ala basculante, por ejemplo, conllevaban ciertas mejoras pero también un peso excesivo, debido a las piezas móviles asociadas. Un avión versátil con alas de forma variable requeriría el uso de materiales "inteligentes" para las funciones de percepción del entorno y generación de movimientos y, acaso, mecanis-

JAMES DELAURIER *Proyecto Ornitóptero*

mos de control de vuelo totalmente nuevos.

Esa clase de técnica constituye la meta de un programa de investigación y desarrollo que patrocina la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para Defensa (DARPA). También en la NASA y en el Centro Aeroespacial Alemán hay en curso un proyecto similar. Para torcer las alas desde dentro, prescindiendo del aire exterior, se están considerando varios tipos de materiales. Entre éstos se cuentan aleaciones con memoria de forma (que responden ante los cambios térmicos) y materiales piezoeléctricos, electroactivos y magnetostrictivos (que se contraen o dilatan por efecto de campos magnéticos o corrientes eléctricas). Pero queda mucho por avanzar en el dominio de tales técnicas.

La magnitud de ajustes geométricos que prevé la dirección de la DARPA incluye una variación del 200 por ciento en la proporción de aspecto (cociente entre el cuadrado de la envergadura y el área de las alas), una variación del 50 por ciento en la superficie de las alas, de 5 grados en la torsión de las alas y de 20 grados en la inclinación de ala (ángulo de ésta con el fuselaje). Además, el peso final del ala no debe superar el de una estructura alar normal. La DARPA espera que los componentes del ala elástica estén integrados en un avión prototipo a finales de 2004, listos para las consiguientes pruebas en túnel de aire.

Uno de los atractivos de utilizar los mecanismos aeroelásticos en vez de las tradicionales superficies de control es que se reduce la reflexión de radar. El bombardero B-2 Spirit, por ejemplo, consigue esquivar los radares mediante el uso de unos segmentos alares de borde de salida hendidos; pero cuando éstos se despliegan, comprometen su furtivismo.

Extender las alas

Las compañías aeronáuticas Lockheed Martin, Raytheon Missiles Systems y NextGen Aeronautics y varios programas universitarios estudian la técnica de ala mórfica. Lockheed Marin está desarrollando un pequeño vehículo aéreo autónomo con alas plegables para misiones militares. El proyecto de Raytheon se centra en un misil crucero Tomahawk con alas telescópicas para la Armada.

El objetivo de NextGen no es tan específico. Un avión teledirigido Firebee de Northrop Grumman constituye su diseño básico. Pretenden desarrollar técnicas que permitan modificar la superficie alar, de modo que un ala de baja resistencia aerodinámica y alta proporción de aspecto pueda transformarse para soportar un ritmo de maniobras intenso. La estrategia consiste en remeter las alas y luego desplegarlas, a la vez que se reduce la superficie alar.

Este proyecto de ampliación y elongación del ala sigue un planteamiento orgánico. Cada módulo se ocupa del desarrollo de un elemento: un revestimiento alar flexible que se adapte suavemente a los cambios de la superficie del ala, una estructura que transporte la carga y, pese a ello, pueda extenderse o contraerse según se requiera, una red de actuadores y un sistema de control adecuado. Este tipo de alas permitiría prescindir de las superficies de control clásicas y gobernar un avión empleando los cambios de geometría, lo que compensaría cualquier aumento de peso debido a los nuevos mecanismos. Para las maniobras de balanceo podría ampliarse levemente el área de una de las alas y así conseguir la diferencia de sustentación necesaria.

Bibliografía complementaria

APPLICATION OF AFW TECHNOLOGY TO THE AGILE FALCON. E. Pendleton, M. Lee y L. Wasserman en *Journal of Aircraft*, vol. 29, n.º 3, págs. 444-457; mayo-junio, 1992.

AN ACTIVE FLEXIBLE WING MULTI-DISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION METHOD. G. D. Miller. Documento de la AIAA, n.º 94-4412-CP, 1994.

SUMMARY OF AN ACTIVE FLEXIBLE WING PROGRAM. B. Perry III, S. R. Cole y G. D. Miller en *Journal of Aircraft*, vol. 32, n.º 1, págs. 10-31; enero-febrero, 1995.

¿Por qué dormimos?

Poco a poco, se va esclareciendo el porqué de que hayamos de dormir

Jerome M. Siegel

Las aves, las abejas, hasta las “pulgas amaestradas” lo hacen, escribió Cole Porter. Se refería a enamorarse, pero podría haber dicho lo mismo del dormir, quizá cambiando las pulgas por las moscas del vinagre. Según Macbeth, dormir “desenreda la maraña de las preocupaciones” y es “bálsamo de las mentes atormentadas, segundo servicio en la mesa de la gran Naturaleza, principal alimento del festín de la vida”. Sancho Panza lo ensalzó, llamándolo “manjar que quita la hambre, agua que ahuyenta la sed, fuego que calienta el frío, frío que templa el ardor... balanza y peso que iguala al pastor con el rey y al simple con el discreto”.

Simples y discretos no han dejado de plantearse dos preguntas afines: Dormir, ¿qué es? ¿Por qué nos es necesario? La segunda tiene una respuesta trillada: para mantenerse despierto y alerta hay que haber dormido bien. Pero así se elude la dificultad; es como decir que se come para no pasar hambre o que se respira para no asfixiarse, cuando la auténtica función de la comida es proporcionar nutrientes y la de la respiración introducir oxígeno y expeler dióxido de carbono. Pero acerca de la función del dormir no contamos con una explicación tan clara. Dicho esto, la investigación del sueño —no llega al siglo que existe como disciplina— ha aportado ya conocimientos suficientes como para formular hipótesis razonables sobre la función de ese estado letárgico que consume un tercio de nuestras vidas.

¿Qué es el sueño?

A Potter Stewart, juez del Tribunal Supremo de los EE.UU. en el tercer cuarto del siglo XX, se le recuerda sobre todo porque, incapaz de definir la obscenidad, sentenció: “La reconozco en cuanto la veo”. Valdría decir lo mismo del sueño. Pese a que resulta difícil definirlo con exactitud, lo normal es que sepamos que alguien duerme: no parecerá prestar atención a su entorno, permanecerá más o menos inmóvil. (Sin embargo, los delfines y otros mamíferos marinos nadan mientras duermen, y algunas aves pueden dormir durante sus largas migraciones.)

En 1953, uno de los pioneros del estudio del sueño, Nathaniel Kleitman, y su alumno Eugene Aserinsky, de la Universidad de Chicago, desacreditaron para siempre la común opinión de que dormir consistía sólo en el cese de la mayor parte de la actividad cerebral. Descubrieron que durante el sueño se distinguían unos períodos en que los ojos se movían con rapidez; se los suele conocer hoy por ‘sueño REM’ (iniciales del inglés ‘Rapid Eyes Movement’). Su existencia implicaba que mientras se dormía, alguna actividad había. En todos los mamíferos terrestres examinados se detecta sueño REM, que va alternando en un ciclo regular con el ‘sueño no REM’, o ‘sueño ligero’.

Más recientemente, el mayor progreso ha consistido en dilucidar la naturaleza del sueño desde un punto de vista neuronal. Durante los últimos 20 años, se ha ido aprendiendo a introducir en distintas regiones del cerebro unos microelectrodos (de sólo 32 micras de grosor, más delgados que el más fino de los cabellos humanos). Estos dispositivos no producen dolor una vez implantados; se los ha aplicado tanto a personas como a una gran variedad de animales de laboratorio, mientras desarrollaban sus actividades normales y mientras dormían. Se ha demostrado así que, como era de esperar, la mayoría de las neuronas cerebrales funcionan, mientras se está despierto, al máximo nivel, o casi, de actividad. Sorprende, en cambio, la variabilidad de las actividades neuronales mientras se duerme. Pese a que durante los sueños REM y no REM la postura e inatención del que duerme se parecen, el cerebro se comporta de modo completamente distinto en esas dos fases.

Durante el sueño no REM, las neuronas efectúan en regiones diferentes tareas distintas. La mayoría de las que se encuentran en el tallo cerebral, justo sobre la médula espinal, reducen o suspenden su actividad mientras que la mayoría de las neuronas de la corteza cerebral y regiones contiguas en la parte anterior del cerebro (prosencéfalo), aunque reducen su estado de excitación, lo hacen en menor medida. El cambio más llamativo se da en la pauta global de actividad. En el estado de vigilia, cada neurona se dedica más o menos a cumplir su propio cometido. Durante el sueño no REM, por contra, las neuronas corticales contiguas actúan sincronizadas, con un ritmo de baja frecuencia. (Por paradójico que parezca, esta actividad eléctrica sincrónica genera ondas cerebrales de un voltaje superior al de las ondas que se producen en estado de vigilia. El cerebro gasta así menos energía.) La respiración y el pulso suelen ser enteramente regulares durante la fase no REM; pocos cuentan que hayan tenido sueños en ella.

Un grupo muy pequeño de células cerebrales (unas 100.000 en los seres humanos), situado en la base del prosencéfalo, desarrolla su máxima actividad sólo durante el sueño no REM. A estas células se les denomina neuronas adormecedoras; al parecer, inducen el sueño. Aún no se sabe qué señales las activan, pero cuando aumenta el calor corporal en estado de vigilia se activan algunas de estas células; ello podría explicar la somnolencia que acompaña tan a menudo a un baño caliente o a un día de verano en la playa.

Durante el sueño REM, en cambio, la actividad cerebral se asemeja a la de su estado de vigilia. El voltaje de las ondas cerebrales es bajo porque las neuronas actúan individualmente. Y la mayoría de las células del prosencéfalo y del tallo están plenamente activas; envían señales a otras neuronas en proporciones tan altas como las observadas en estado de vigilia; si no más altas. Durante el sueño REM el cerebro gasta tanta energía como despierto. La máxima actividad neuronal acompaña a los espasmos y movimientos del ojo que dan su nombre al sueño REM. Las células especializadas del tallo cerebral inductoras del sueño REM se vuelven especialmente activas durante éste. Parecen ser las responsables de generar tal estado.

Soñamos sobre todo durante la fase REM. Los sueños van acompañados de una activación frecuente de los sistemas motores del cerebro, que, si no, sólo funcionan mientras nos movemos despiertos. Por fortuna, dos acciones bioquímicas complementarias inhiben en su mayor parte el movimiento durante el sueño REM. El cerebro suspende la liberación de ciertos neurotransmisores (moléculas que transmiten señales de una neurona a otra en las sinapsis, o puntos de conexión entre dos neuronas) y libera otros; es decir, el cerebro suprime los que activarían las motoneuronas (las células cerebrales que controlan los músculos) y da vía libre a los que las desactivan. Estos mecanismos, empero, no afectan a las motoneuronas controladoras de los músculos que mueven los ojos, posibilitándose así los rápidos movimientos oculares que dan su nombre a la fase del sueño REM.

El sueño REM afecta también profundamente a los sistemas cerebrales que controlan los órganos internos del cuerpo. Por ejemplo, el pulso y la respiración se vuelven irregulares durante su transcurso, tal y como ocurre mientras estamos despiertos. Asimismo, la regulación de la temperatura del cuerpo se torna menos fina y va siguiendo, como la de un reptil, la del ambiente. Además, en los machos se producen con frecuencia erecciones y las hembras experimentan dila-



tación del clítoris, aun cuando la mayor parte del contenido de los sueños no es sexual.

Esta breve descripción del sueño, en su aspecto exterior y a escala celular, resulta precisa, pero tan insatisfactoria como levantarse sin haber dormido lo suficiente. Persiste la intrigante pregunta: ¿Para qué sirve dormir?

La función del dormir

Recientemente, en un congreso sobre el sueño, comentó uno de los asistentes que la función del dormir sigue siendo un misterio. La moderadora de la sesión arguyó con vehemencia en contra de tal tesis, pero no pasó a explicar con exactitud *por qué* la función del sueño no era ya misteriosa. A este respecto, aún no hay general acuerdo. Sin embargo, basándome en los datos actualmente disponibles, desarrollaré una hipótesis que muchos consideramos razonable.

Una manera de enfocar la investigación sobre la función del dormir es ver qué cambios fisiológicos y del comportamiento se siguen del no dormir. Hace ya más de una década se comprobó que a las ratas les es mortal que no se las deje en absoluto dormir. Aunque se les aumente mucho la comida, pierden peso en tal circunstancia, fenómeno que sugiere una excesiva pérdida de calor. Y mueren, por causas todavía no explicadas, en el plazo de 10 a 20 días, antes que si se les privara de toda comida pero se les dejase dormir normalmente.

En los humanos, una enfermedad cerebral degenerativa, muy rara, el insomnio letal familiar, lleva a la muerte al cabo de pocos meses. No está claro si lo letal es la falta misma del sueño u otros aspectos del deterioro cerebral de esos enfermos. Se ha comprobado que la somnolencia aumenta aun cuando sólo se reduzcan un poco los tiempos de sueño nocturno. Quedarse dormido mientras se conduce o durante otras actividades que requieren vigilancia continua resulta tan peligroso como tomar alcohol antes de emprender las tareas en cuestión. Pero hay pruebas palmarias de que “ayudar” a alguien a que duerma más mediante el uso prolongado de somníferos no aporta ningún claro beneficio a su salud; hasta puede acortarle la vida.

Resumen/*El sueño*

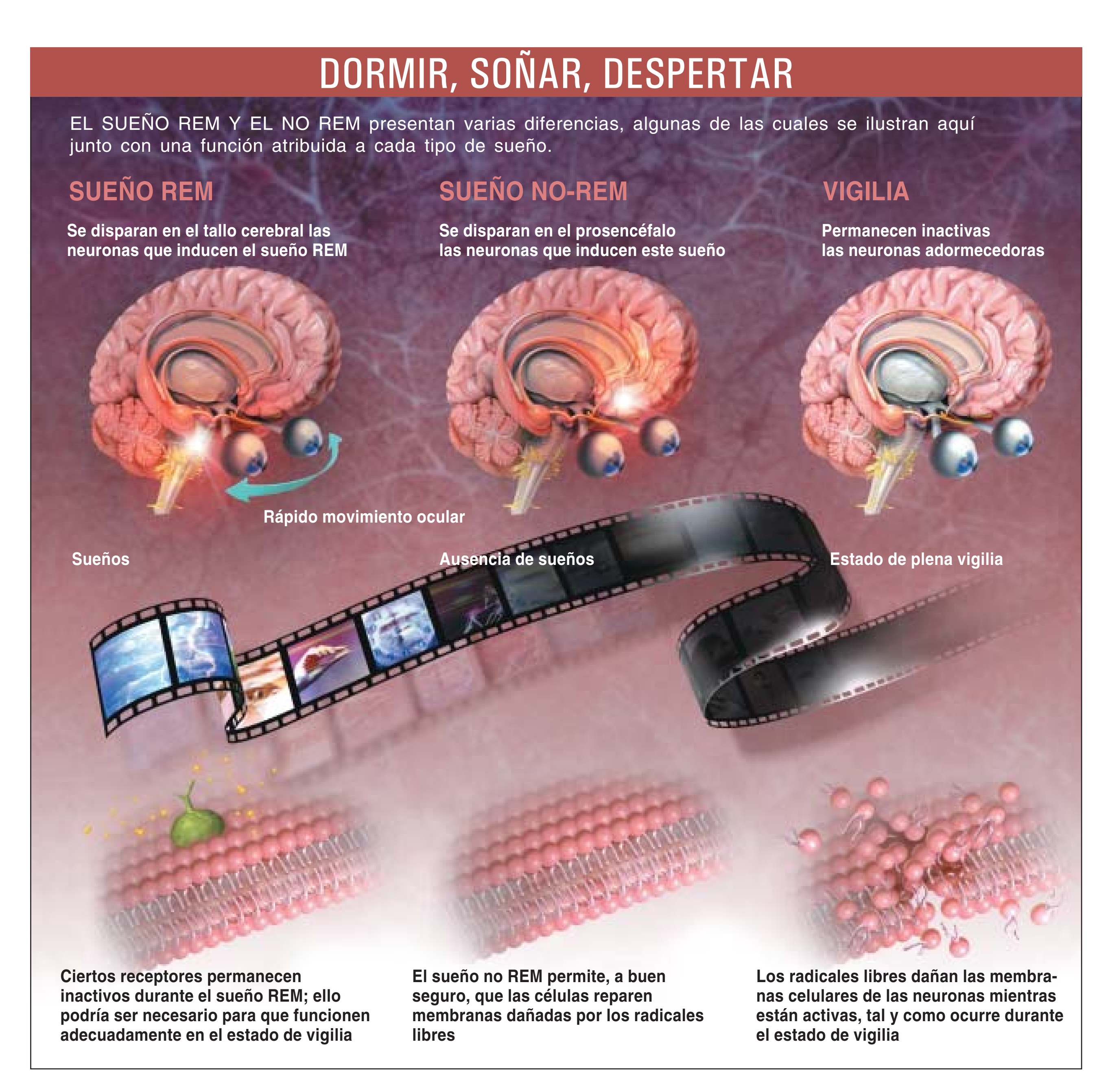
- Se debate aún sobre la función y necesidad de los sueños REM y no REM. Nuevos hallazgos apuntan varias hipótesis razonables.
- Según una de ellas, la reducida actividad del cerebro durante el sueño no REM podría dar la oportunidad de autorrepararse a muchas neuronas.
- Otra hipótesis sostiene que la interrupción durante el sueño REM de la liberación de las monoaminas, quizá permita recuperar toda su sensibilidad a los receptores cerebrales de estos neurotransmisores, que intervienen en la regulación del humor y del aprendizaje.
- La intensa actividad neuronal del sueño REM a corta edad quizá favorezca el desarrollo adecuado del cerebro.

(Entre los seres humanos, una vida más larga guarda correlación con dormir cada noche unas siete horas.) Tan inexorablemente instintiva es la tendencia al sueño, que para suprimirlo por completo se requiere repetida e intensa estimulación. De ahí que los investigadores que emplean la privación del sueño para estudiar la función del dormir tropiecen en seguida con la dificultad de distinguir entre los efectos del estrés y los de la falta de sueño.

También se estudian los hábitos de sueño propios de diversos organismos. Un importante indicio acerca de la función del dormir estriba en la gran variedad del tiempo de sueño que las diferentes especies necesitan. Por ejemplo, la zarigüeya duerme 18 horas al día, mientras que el elefante se las arregla con sólo tres o cuatro. En especies muy afines, con semejanzas genéticas, fisiológicas y de comportamiento, sería también de esperar que se dieran parecidos hábitos de sueño. Sin embargo, estudios hechos en laboratorios, en zoológicos y con animales en libertad han revelado que los tiempos de sueño no guardan relación con la clasificación taxonómica de los animales: los números de horas dormidas por los primates definen un intervalo que en buena medida coincide con el de los roedores, que se solapa a su vez con el de los carnívoros, y así sucesivamente a través de muchos órdenes de mamíferos. Si la afinidad evolutiva no determina el tiempo de sueño, ¿qué la determina?

La respuesta resulta sorprendente: el principal factor determinante reside en el tamaño; es decir, los animales mayores necesitan dormir menos. Los elefantes, las jirafas y los grandes primates (como los humanos) necesitan dormir, en comparación, bastante poco; las ratas, los gatos, los ratones de campo y otros animales pequeños se pasan la mayor parte de su vida durmiendo. La causa parece guardar relación con la tasa metabólica y la temperatura cerebral y corporal. Los animales de talla pequeña presentan un metabolismo basal más alto y una temperatura cerebral y corporal más elevada que los que caracterizan a los animales de talla mayor. Y el metabolismo es una complicada fábrica que produce radicales libres (sustancias químicas sumamente reactivas que dañan e incluso matan a las células). Por eso, unas tasas metabólicas altas deterioran más las células y los ácidos nucleicos, proteínas y lípidos que contienen.

El daño que los radicales libres ocasionan en muchos tejidos del cuerpo puede contrarrestarse reemplazando las células afectadas con otras nuevas, producidas por división celular; pero después del nacimiento, la mayoría de las regiones del cerebro no forman ya cantidades significativas de nuevas neuronas. (El hipocampo, que interviene en el aprendizaje y en la memoria, constituye una importante excepción.) La menor tasa metabólica y la inferior temperatura cerebral que se dan durante el sueño no REM parecen brindar una oportunidad para que se contrarreste el daño producido durante el estado de vigilia. Por ejemplo, puede que durante los períodos de inactividad las enzimas sean más eficaces en la reparación de células. O que reemplacen a enzimas viejas, degradadas por radicales libres, otras recién sintetizadas y estructuralmente sanas.



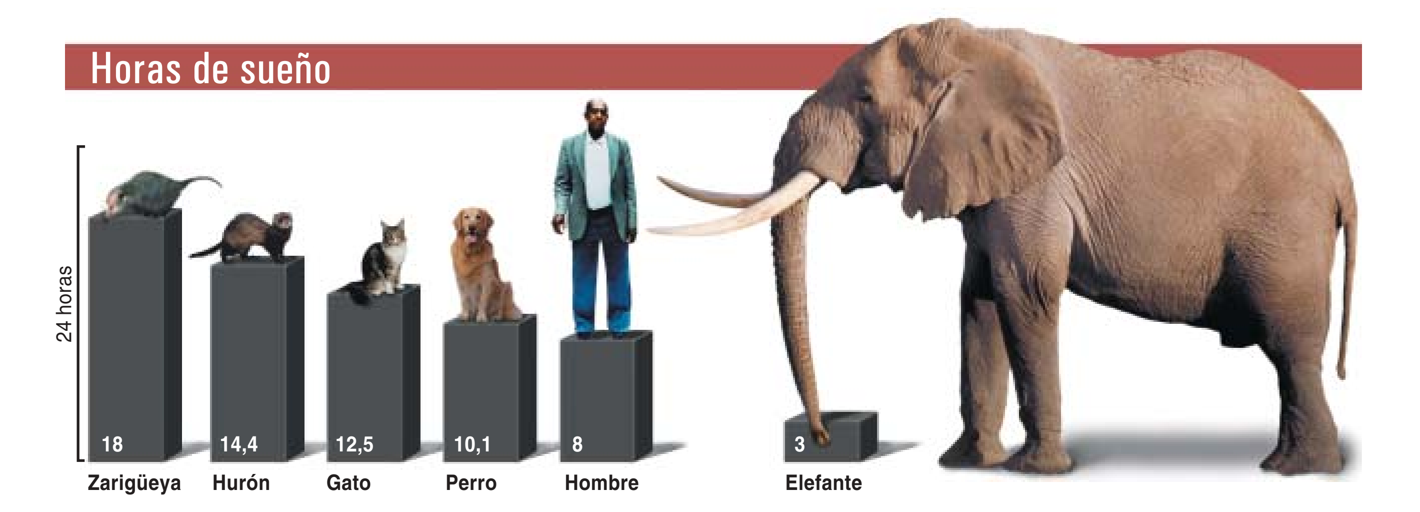
KEITH KASNOT

El año pasado mi equipo de la Universidad de California en Los Angeles observó en ratas la primera prueba, creemos, de daños inducidos en las células cerebrales por haber impedido que duerman. Este hallazgo corrobora la idea de que el sueño no REM previene del daño metabólico.

Sin embargo, el sueño REM sigue desconcertándonos. La hipótesis de la reparación de células quizá explique el sueño no REM, pero no sirve para el sueño REM. A fin de cuentas, la mayoría de las neuronas no pueden conocer una pausa reparadora durante el sueño REM: se hallan tan activas, por lo menos, como durante el estado de vigilia. Pero hay un grupo específico de células cerebrales que contravienen esta tendencia; revisten particular interés en la búsqueda de la función del sueño REM.

Recuérdese que la liberación de algunos neurotransmisores cesa durante el sueño REM; se imposibilita con ello el movimiento del cuerpo y se reduce la percepción del entorno. Los neurotransmisores clave afectados —noradrenalina, serotonina e histamina— reciben el nombre de monoaminas porque cada uno de ellos contiene un solo grupo amina (una molécula de amoníaco donde un hidrógeno es sustituido por radicales monovalentes de hidrocarburos con enlaces simples entre carbonos). La actividad de esas células cerebrales productoras de monoaminas es máxima e ininterrumpida durante la vigilia. Pero Dennis McGinty y Ronald Harper, de la Universidad de California en Los Angeles, descubrieron en 1973 que dejan de segregarlas durante el sueño REM.

En 1988 Michael Rogawski, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, y el autor propusieron que el cese de la liberación de neurotransmisores es vital para el adecuado funcionamiento de estas neuronas y de sus receptores (las moléculas de las célu-



EL TAMAÑO DEL CUERPO parece ser el principal determinante del número de horas de sueño que cada especie necesita. En general, cuanto mayor sea el animal, menos tiempo tendrá que dormir. Los datos indican que una de las funciones del dormir consiste en reparar los daños sufridos por las neuronas. Las tasas metabólicas más altas de los animales pequeños aumentan en ellos el deterioro celular; por ende, también el tiempo que se necesita para repararlo.

NINA FINKEL (*gráfica*); W. PERRY CONWAY *Corbis* (*zarigüeya*); RENEE LYNN *Photo Researchers, Inc.* (*elefante*)

las receptoras que transmiten al interior de éstas las señales de los neurotransmisores). Varios estudios indican que una constante liberación de monoaminas puede desensibilizar a los receptores de los neurotransmisores. La interrupción de la secreción de monoamina durante el sueño REM quizá permita, pues, que los sistemas receptores "descansen" y recobren toda su sensibilidad. Y esta restaurada sensibilidad podría desempeñar un papel crucial durante la vigilia en la regulación del estado de ánimo, que depende de la colaboración eficaz entre los neurotransmisores y sus receptores. (Los antidepresivos, entre otros Prozac, Paxil y Zoloft, que pertenecen a la categoría de los "inhibidores de la reabsorción selectiva de serotonina" —SSRI— operan causando un neto aumento del total de serotonina a disposición de las células receptoras.)

Las monoaminas intervienen también en el establecimiento de nuevas conexiones neuronales ante nuevas experiencias. Con su desactivación durante el sueño REM, quizá se prevenga la creación de cambios indeseables de las conexiones cerebrales formadas en virtud de la intensa actividad de otras neuronas durante esa fase.

En el año 2000, Paul J. Shaw y sus compañeros del Instituto de Neurociencias de La Jolla, observaron que en las moscas de la fruta se da una conexión entre los niveles de monoamina y períodos como de somnolencia en los que permanecen inactivas. Hallaron que interrumpir ese período de inactividad de las moscas aumentaba los niveles de monoaminas, como ocurre en los humanos. Este descubrimiento indica que la restauración de la función neurotransmisora, que a la larga llegaría a ser una característica de lo que ahora conocemos como sueño, existía ya mucho antes de que los mamíferos evolucionaran sobre la Tierra.

El autor

JEROME M. SIEGEL, profesor de psiquiatría y miembro del Instituto de Investigaciones del Cerebro de la Universidad de California en Los Angeles, dirige el departamento de neurobiología del Hospital Sepulveda.

Otras posibilidades

¿Qué más podría ocurrir durante el sueño REM? Frederick Snyder y Thomas Wehr, del Instituto Nacional de la Salud, y Robert Vertes, de la Universidad Atlántica de Florida, entre otros, han propuesto la hipótesis de que la elevada actividad desarrollada durante el sueño REM por neuronas que no intervienen en la producción de monoamina prepara a los mamíferos mejor que a los reptiles a afrontar los peligros del entorno. Cuando los reptiles están despiertos en un entorno frío, se vuelven lentos, apáticos; sólo serán de nuevo activos y sensibles con una fuente de calor externa. Pero aunque los mamíferos no se termorregulan durante el sueño REM, la intensa actividad neuronal de esta fase quizás aumente la tasa metabólica cerebral; les valdría a los mamíferos, al despertar, para fijar la atención en una situación dada y reaccionar con más rapidez a ella. Que los seres humanos estemos mucho más alerta cuando despertamos durante el sueño REM que si lo hacemos en los períodos no REM corrobora esta idea.

Algunos estudios sobre la privación del sueño indican, sin embargo, que el sueño REM ha de valer para algo más que para preparar al cerebro a afrontar las experiencias del estado de vigilia. Muestran que los animales forzados a vivir sin sueño REM exhiben un lapso de éste mayor que el usual cuando se les da por fin la oportunidad. No parece sino que traten de pagar la 'deuda' —otro indicio más de que el sueño REM es importante—. Si despabilar el cerebro fuese la única función del sueño REM, para pagar la deuda bastaría con estar despierto, pues también el cerebro despierto es cálido y activo. Pero está claro que no

basta. Quizá la deuda de sueño REM resulte del descanso que los sistemas monoamínicos y otros sistemas necesitan, inactivados durante este sueño.

Queda así refutada la vieja idea de que la privación del sueño REM lleva a la locura (si bien algunos estudios demuestran que impedirle a alguien que duerma, por ejemplo despertándolo repetidas veces, llega a producirle irritabilidad). La privación de sueño REM puede incluso aliviar la depresión clínica. No está claro por qué; puede que la privación imite los efectos de los antidepresivos SSRI, ya que evita la caída normal de monoaminas durante el REM y, en cambio, aumenta la concentración sináptica de neurotransmisores que escasea en las personas deprimidas.

Algunos siguen pensando que el sueño REM podría tener un papel en la fijación de los recuerdos, pero las pruebas en pro de tal función son débiles y contradictorias. Entre los datos en contra se incluye la comprobación de que sujetos con lesiones cerebrales que les privan del sueño REM, o con este sueño bloqueado por drogas, tienen una memoria normal, o incluso aumentada. Y aunque la falta de sueño antes de una tarea dificulta el concentrarse en ella y el realizarla debidamente —los estudiantes somnolientos ni aprenden ni discurren bien—, en cambio, la privación de sueño REM tras haber aprendido algo con plena lucidez no parece que dificulte la retención de lo aprendido. Además, los delfines, que experimentan poco o ningún sueño REM, dan muestras de una impresionante capacidad de razonar y aprender.

La capacidad de aprender no parece guardar relación, en unas u otras especies, con la duración total del sueño REM. Los tiempos de sueño REM de los seres humanos —de 90 a 120 minutos cada noche— no son demasiado largos si se los compara con los de otros mamíferos. (Y las personas con un cociente de inteligencia alto o un rendimiento escolar mejor no tienen más, ni menos, sueño REM que las demás.) Pero el tiempo total que se pasa en el sueño REM sí cambia a lo largo de la vida del individuo. En todos los animales estudiados, es mayor al principio de la vida y va disminuyendo gradualmente hasta llegar en la edad adulta a un número estable de horas menor. Comparando numerosas especies se obtiene un fascinante dato adicional: no hay mejor modo de predecir el tiempo de sueño REM que corresponderá al adulto de una especie determinada que fijarse en el grado de inmadurez que presentan los vástagos de esa especie cuando nacen.

En 1999 Jack Pettigrew y Paul Manger, de la Universidad de Queensland en Australia, y el autor tuvieron la ocasión de estudiar un raro sujeto de investigación, el ornitorrinco. Este mamífero, el más antiguo evolutivamente de los hoy existentes, nos sorprendió al revelársenos como el campeón en dormir el sueño REM: unas *ocho horas* cada día. Pues bien, este animal, que nace completamente indefenso y ciego, es incapaz de termorregularse y de encontrar por sí solo el sustento; tras el nacimiento permanece largas semanas adherido a su madre. En el otro extremo, el delfín recién nacido puede y necesita termorregularse, nadar, seguir a su madre y evitar a los depredadores. Y, como antes dijimos, los delfines adultos casi no conocen el sueño REM.

Se debe a Michael Jouvet, el investigador del sueño que hace cuatro décadas descubrió que el tallo cerebral genera el sueño REM, una sugerente idea a propósito de los grandes lapsos REM de los animales inmaduros. Piensa que la intensa actividad neuronal y el consumo de energía que se dan en el sueño REM tienen, al comenzar la vida, la función de establecer las conexiones neuronales genéticamente programadas que posibilitan el comportamiento instintivo. Antes del nacimiento, o en animales de desarrollo sensorial tardío, el sueño REM quizás actúe como un sustituto de la estimulación externa; ésta promovería el desarrollo de las neuronas en los animales que nacen plenamente desarrollados. Apoya esta hipótesis una investigación de Howard Roffwarg, director del Centro de Trastornos del Sueño del Centro Médico de la Universidad de Mississippi, y sus colaboradores. Halló anomalías en el desarrollo del sistema visual de los gatos cuando se los privaba al principio de su vida del sueño REM.

Los animales que a poco de nacer tiene largos períodos REM conservan de adultos una mayor propensión a ese tipo de sueño. ¿Por qué la inmadurez al nacer causa largos sueños REM en la edad adulta? Desde una perspectiva evolucionista, los animales con un sueño REM breve necesitarían menos nutrimentos y dejarán más descendencia que los que pasan por largos períodos de alto consumo energético. Es muy probable que en los animales en que aún es largo el sueño REM haya ido evolucionando algún uso de éste que no se halla en los animales precozmente activos. Pero está todavía por identificar. Los investigadores del sueño confían en que los progresos en la determinación de las regiones cerebrales que controlan el sueño REM y el sueño no REM llevarán pronto a una más comprensiva y satisfactoria explicación del dormir y sus funciones. A medida que se vayan dilucidando los mecanismos y la evolución del sueño, probablemente iremos sabiendo con exactitud qué se repara y qué descansa, por qué tales procesos se realizan mejor durmiendo y por qué nos ayudan a mantenernos despiertos.

Bibliografía complementaria

ENCYCLOPEDIA OF SLEEP AND DREAMING. Dirigida por Mary A. Carskadon. Macmillan, 1993.

NARCOLEPSIA. Jerome M. Siegel en *Investigación y Ciencia*, n.º 282, marzo de 2000.

PRINCIPLES AND PRACTICE OF SLEEP MEDICINE. Dirigido por Meir H. Kryger, Thomas Roth y William C. Dement. W. B. Saunders, 2000.

SLEEP AND DREAMING. Allan Rechtschaff y Jerome M. Siegel, en *Principles of Neural Science*. 4.ª edic. Dirigido por Eric R. Kandel, James H. Schwartz y Thomas M. Jessell. McGraw-Hill/Appleton & Lange, 2000.

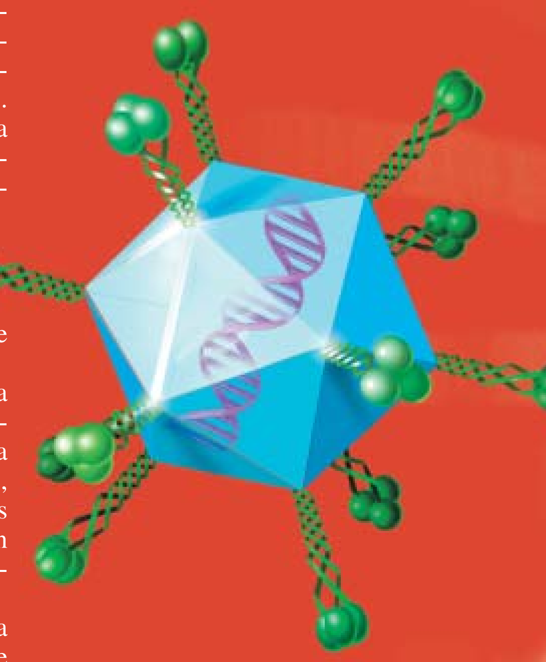
THE REM SLEEP-MEMORY CONSOLIDATION HYPOTHESIS. Jerome M. Siegel, en *Science*, vol. 294, págs. 1058-1063; 2 de noviembre, 2001.

Vectores víricos antitumorales

La viroterapia domeña los virus y los ordena a la prevención y curación del cáncer

Dirk M. Nettelbeck y David T. Curiel

Los virus constituyen una de las creaciones más insidiosas de la naturaleza. Ligeros de equipaje, viajan con su escueto material genético apretadamente empaquetado en el interior de una cápsula proteica cristalina. Se anclan en las células y les transfieren sus genes. Obligan así a torcer la función de los mecanismos celulares de la replicación de genes y síntesis de proteínas; en adelante, esa maquinaria se aplicará a la fabricación de miles de millones de partículas víricas. Una vez formados, los nuevos virus cursan hacia la superficie celular, arrancan un trozo de membrana, se cubren con ella y salen envueltos en una suerte de burbuja, o bien prosiguen multiplicándose en el interior hasta que la célula estalla. En cualquier caso, acabarán por infectar y destruir otras células, dando lugar a toda suerte de enfermedades: desde el sida hasta el resfriado común.



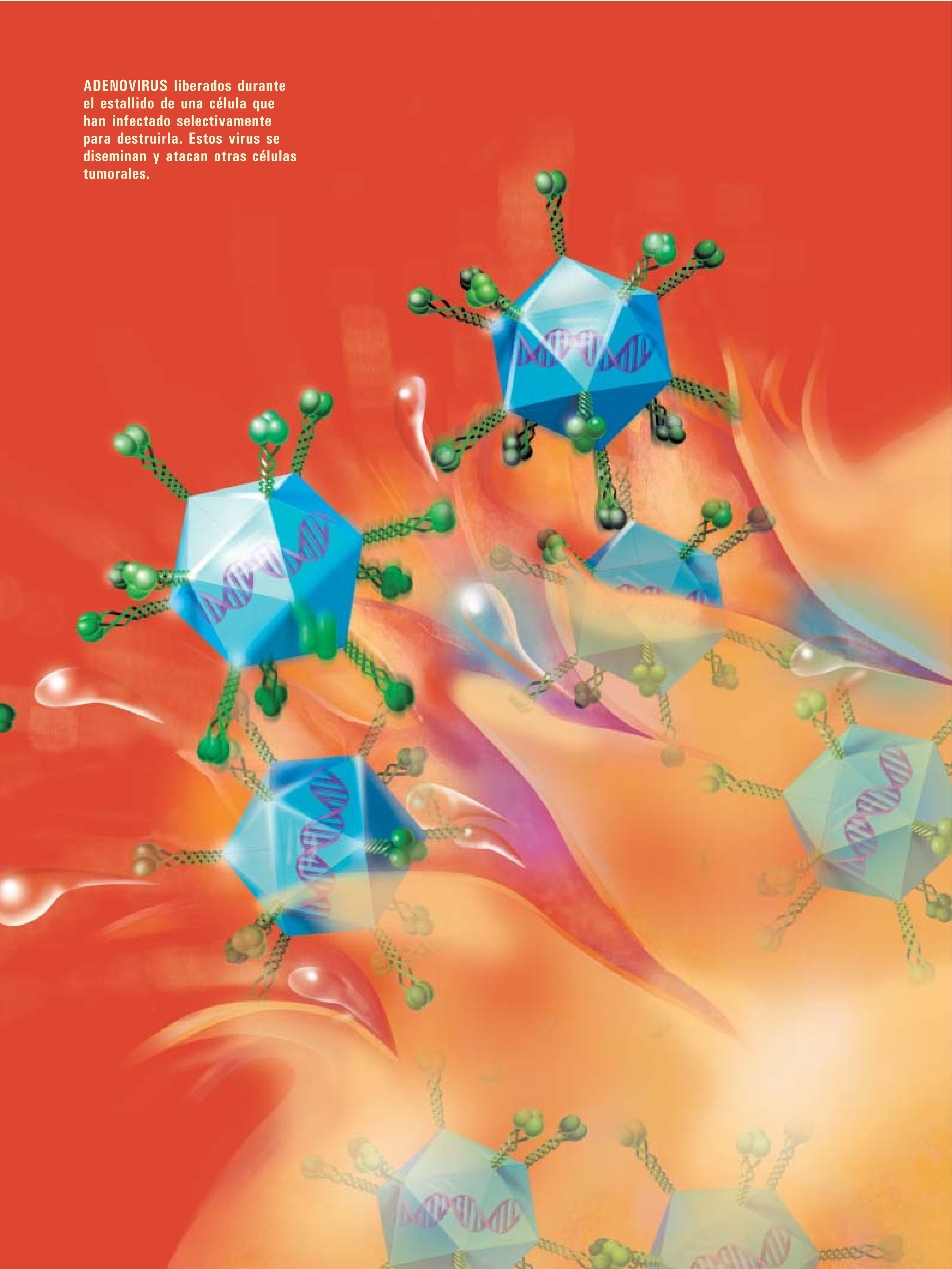
TERESE WINSLOW

Virus distintos causan enfermedades diferentes. Ello se debe, en parte, a su especificidad de unión a los receptores de membrana. Las células hepáticas portan el tipo de receptor que se acopla con una familia determinada de virus; las neuronas muestran el que encaja con otra, Por consiguiente, cada familia vírica infecta un tipo de célula. Los oncólogos llevaban años soñando con semejante selectividad. Si lograran centrar las oncoterapias en las células tumorales, y evitar dañar las sanas, obviarían muchos de los efectos secundarios de las medidas indicadas.

Varios grupos de investigación, incluido el nuestro, se afanan ahora en la modificación genética de virus para convertirlos en una suerte de misiles de búsqueda y destrucción; es decir, infectar y matar, de modo selectivo, las células malignas, sin alterar las células sanas. A ese nuevo enfoque se le denomina viroterapia. Se ha comprobado con éxito en ensayos con animales. Están en marcha las pruebas con humanos. El nuevo procedimiento se evalúa en sus propias posibilidades y en su capacidad para administrar quimioterapia a las células tumorales. Asimismo, se están desarrollando métodos que se apoyan en marcadores fluorescentes o radiactivos para seguir el movimiento de los agentes víricos en el paciente.

¿Virus que acuden a la llamada?

Uno de los primeros indicios de la utilidad de los virus para combatir el cáncer apareció en 1912. Cierto ginecólogo italiano observó la regresión de un cáncer cervical en una mujer a la que había inoculado vacuna antirrábica preparada a partir de una forma viva, aunque atenuada, del virus



ADENOVIRUS liberados durante el estallido de una célula que han infectado selectivamente para destruirla. Estos virus se diseminan y atacan otras células tumorales.

de la rabia. En clínica comenzó la inyección intencionada de virus a los pacientes de cáncer a finales de los años cuarenta, si bien la terapia fracasó en la mayoría de los casos. Veinte años después, se descubrió que el virus causante de la enfermedad de Newcastle, una afección animal, mostraba preferencia por la infección de células tumorales; se intentó potenciar esta tendencia cultivando *in vitro* los virus, durante generaciones, en células cancerosas humanas. Los escépticos objetaban que tales virus sólo ejercerían un efecto indirecto contra el cáncer: tras activar el sistema inmunitario, éste podría detectar y destruir con más facilidad las células cancerosas. Pese a tales reticencias, fueron aumentando los escritos médicos que vinculaban la infección vírica con la remisión del cáncer. A comienzos de los años setenta y ochenta, se describieron varios casos de pacientes cuyos linfomas disminuyeron tras contraer el sarampión.

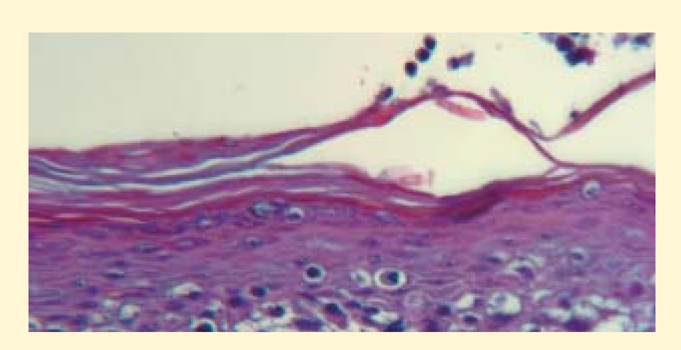
El concepto moderno de la viroterapia surgió a finales de los años noventa. Los equipos dirigidos por Frank McCormick, de ONYX Pharmaceuticals en Richmond, y Daniel R. Henderson, de Calydon en Sunnyvale, publicaron informes independientes sobre su efectividad, en los que mostraban que la viroterapia permitía abordar células cancerosas humanas injertadas en ratones, con la eliminación consiguiente de los tumores. En ambos estudios se utilizaba adenovirus, responsable del resfriado común. (Se hallan en investigación los virus del herpes simple, parvovirus, viruela y reovirus.) El interés del adenovirus reside, en buena medida, en el dominio de su biología, tras la experiencia acumulada en el tratamiento del resfriado común, en biología de fagos y en terapia génica. El adenovirus consta de una cápsula proteica que forma un icosaedro, repleta de ADN y equipada con 12 "brazos" proteicos. Estas protuberancias, adquiridas en el curso de la evolución, le permiten unirse a un receptor celular, cuya función normal estriba en facilitar la adherencia intercelular.

Los adenovirus difieren de los virus que acostumbran emplearse en terapia génica para tratar las enfermedades hereditarias. En terapia génica, los retrovirus se emplean para introducir, de forma permanente, una copia activa de un gen en el organismo del sujeto que ha perdido la funcionalidad del gen en cuestión. Los adenovirus, en cambio, no integran su ADN en los genes de las células que infectan; el material genético que transportan hasta la célula opera sólo durante un corto período de tiempo y después se disgrega. Sí se han investigado las posibilidades de los adenovirus en oncoterapia fundada en procedimientos de ingeniería genética: se dota a los adenovirus con genes que aumenten la sensibilidad de los tumores a la quimioterapia. Aunque en general los tests acometidos con adenovirus resultan inocuos, no podemos silenciar el fallecimiento de un voluntario tras recibir una infusión de adenovirus en el marco de un ensayo sobre la aplicación de la terapia génica a un trastorno hepático hereditario.

Se ha venido trabajando en el refinamiento de la seguridad que debe rodear a la terapia génica con adenovirus, otros vectores víricos y sistemas de transferencia de genes. Los primeros interesados en ello son los propios investigadores, expuestos como se hallan a los microorganismos. La mayoría de nosotros ha sufrido alguna vez una infección de adenovirus y, por consiguiente, posee anticuerpos preparados para identificarlos y destruirlos. En estas condiciones, una terapia anticancerosa basada en la inyección de adenovirus podría resultar problemática: si el organismo los reconoce como foráneos intentará erradicarlos mediante una respuesta inmunitaria que dará lugar a síntomas severos, semejantes a los de la gripe. La eliminación del virus representaría el éxito del sistema inmunitario, aunque también el fracaso de la terapia. Existen diversas estrategias terapéuticas diseñadas para optimizar la eficacia de la viroterapia y minimizar los efectos secundarios de los adenovirus. Incluyen la administración de fármacos inmunosupresores durante la viroterapia y la modificación de los adenovirus con el fin de evitar una reacción del sistema inmunitario.

OBJETIVO MELANOMA

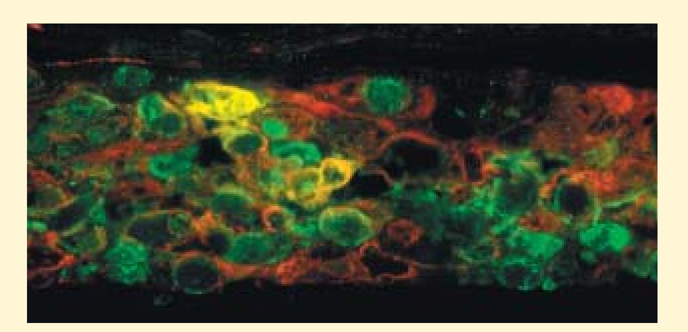
Un cáncer de piel, el melanoma, constituye uno de los tumores más letales, si escapa a la detección precoz. Surge del crecimiento incontrolado y la difusión de los melanocitos, células pigmentarias de la piel. Se recurre a la viroterapia para la destrucción selectiva de las células del melanoma sin dañar las células sanas. Para estudiar el tumor, se combinan células de melanoma (*puntos oscu-*

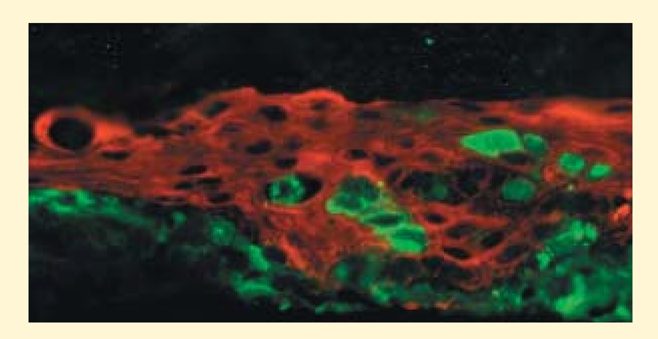


Resumen/*Virus antitumorales*

- La viroterapia constituye un nuevo método contra el cáncer. Mata las células malignas, a través de una infección vírica dirigida. Se están ensayando distintos enfoques para conseguir que los adenovirus y otros virus alcancen el tumor sin dañar las células normales.
- Los virus empleados en esta técnica novedosa cumplen su función letal mediante la destrucción directa de la célula cancerosa o mediante la incorporación en el genoma celular de genes que aumentan su sensibilidad a las quimioterapias tradicionales.
- En la viroterapia, los virus también se marcan con indicadores fluorescentes o radiactivos. Una vez en el organismo, invaden las células cancerosas. En el futuro, estas técnicas de formación de imágenes podrán aplicarse a la detección precoz de tumores.

ros de la micrografía izquierda de la secuencia inferior) con queratinocitos, células sanas de la piel y colágeno; la piel artificial cancerosa resultante se cultiva *in vitro*. Nettelbeck y su equipo han diseñado un adenovirus que sólo se reproduce en las células de melanoma. En las micrografías del centro y de la derecha, los queratinocitos sanos aparecen en color rojo; las células tumorales infectadas por el virus, en verde. La micrografía central se realizó tras utilizar virus no dirigidos específicamente contra el melanoma. Los virus medraron también en las células normales, que aparecen en amarillo. En la micrografía de la derecha, en cambio, no se observan células amarillas, puesto que los virus dirigidos sólo se replicaron en las células del melanoma.





DIRK M. NETTELBECK *Universidad de Erlangen* Y N. SANJIB BANERJEE, THOMAS R. BROKER Y LOUISE T. CHOW *Universidad de Alabama, Birmingham*

Dar en el blanco

Para asegurar que los virus alcanzan su objetivo en las células tumorales, sin dañar las circundantes, se cuenta con dos enfoques fundamentales: el transduccional y el transcripcional. Mediante el primero se pretende que los virus transfieran su ADN preferentemente a células cancerosas. Con el segundo se alteran los virus para que sus genes se transcriban sólo en tumores.

El enfoque transduccional resulta especialmente necesario por una razón poderosa. Los adenovirus se unen con mayor eficacia a los tejidos sanos que a los tumorales. Pero podemos invertir ese patrón de comportamiento mediante el uso de moléculas adaptadoras constituidas por anticuerpos que se acoplan a los brazos del virus, como una llave a su cerradura. Con unos anticuerpos bien escogidos u otras moléculas que se unan de manera selectiva a las proteínas específicas de las células cancerosas, podemos forzar a los adenovirus para que sólo infecten células malignas. Una vez que el virus portador de anticuerpo se aferra a la célula diana, ésta lo engloba en un saco membranoso y lo atrae hacia su interior. Cuando el saco se desintegra, la cápside vírica viaja hacia un poro del núcleo celular, por donde introduce su propio ADN. Bajo las órdenes de éste, la célula no tarda en comenzar a fabricar copias de dicho ADN vírico, sintetizar proteínas de virus y conjugar ambos en miles de millones de nuevos adenovirus. Repleta la célula, el virus activa el "gen de la muerte": la célula estalla y libera los virus, prestos para infectar otras células.

La ingeniería genética nos permite una manipulación más directa de los virus. El grupo de Curiel, de la Universidad de Alabama, ha diseñado adenovirus que se unen a las integrinas. Estas proteínas de la membrana celular participan en la adherencia de las células con la matriz extracelular del tejido conectivo. Aunque las células sanas también sintetizan integrinas, las cancerosas producen la molécula sin tasa cuando devienen metastásicas y empiezan a diseminarse por el organismo. En la Universidad de Alabama se han obtenido resultados prometedores en ratones genéticamente manipulados para que expresaran cáncer de ovario humano. Los virus se instalaban en células ováricas tumorales y las destruían, liberando de la enfermedad al animal.

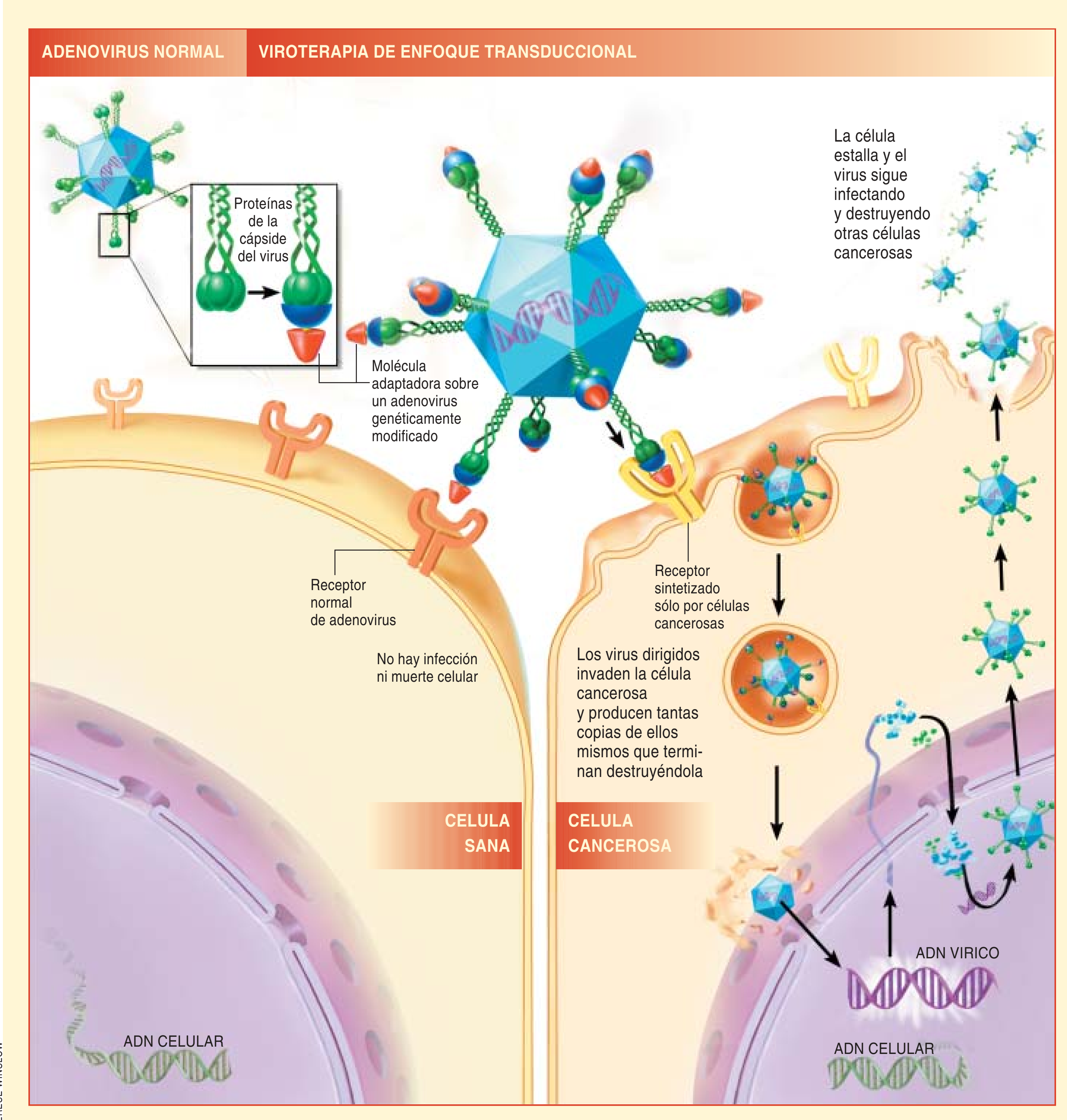
El enfoque transcripcional saca partido de los conmutadores genéticos, promotores que dictan la frecuencia de activación de un gen —tasa de síntesis proteica— en un tipo determinado de célula. Aunque todas las células del organismo portan la misma dotación genética, unas utilizan parte de dicha información más a menudo que otras, en función de la misión que les corresponde cumplir. Los melanocitos, por ejemplo, necesitan sintetizar más melanina que los hepatocitos, que apenas si requieren de esta proteína. Por tanto, el promotor de la enzima encargada de que se proceda a la síntesis de melanina está "encendido" en las células de la piel, pero "apagado" en la mayoría de las demás células del organismo. En el melanoma, un cáncer letal de la piel, el gen que codifica esta enzima opera a pleno rendimiento, obscureciendo la neoformación tumoral. La ingeniería genética nos ha permitido obtener adenovirus portadores de un promotor

Los autores

DIRK M. NETTELBECK y DAVID T. CURIEL iniciaron su colaboración en el centro de terapia génica de la Universidad de Alabama en Birmingham (UAB), donde Curiel dirige la división de terapia génica humana. Nettelbeck, biólogo molecular, se doctoró en la Universidad Philipps, de Marburg. Lidera un grupo que investiga aplicación de la viroterapia al melanoma maligno, en el departamento de dermatología de la Universidad de Erlangen-Nuremberg.

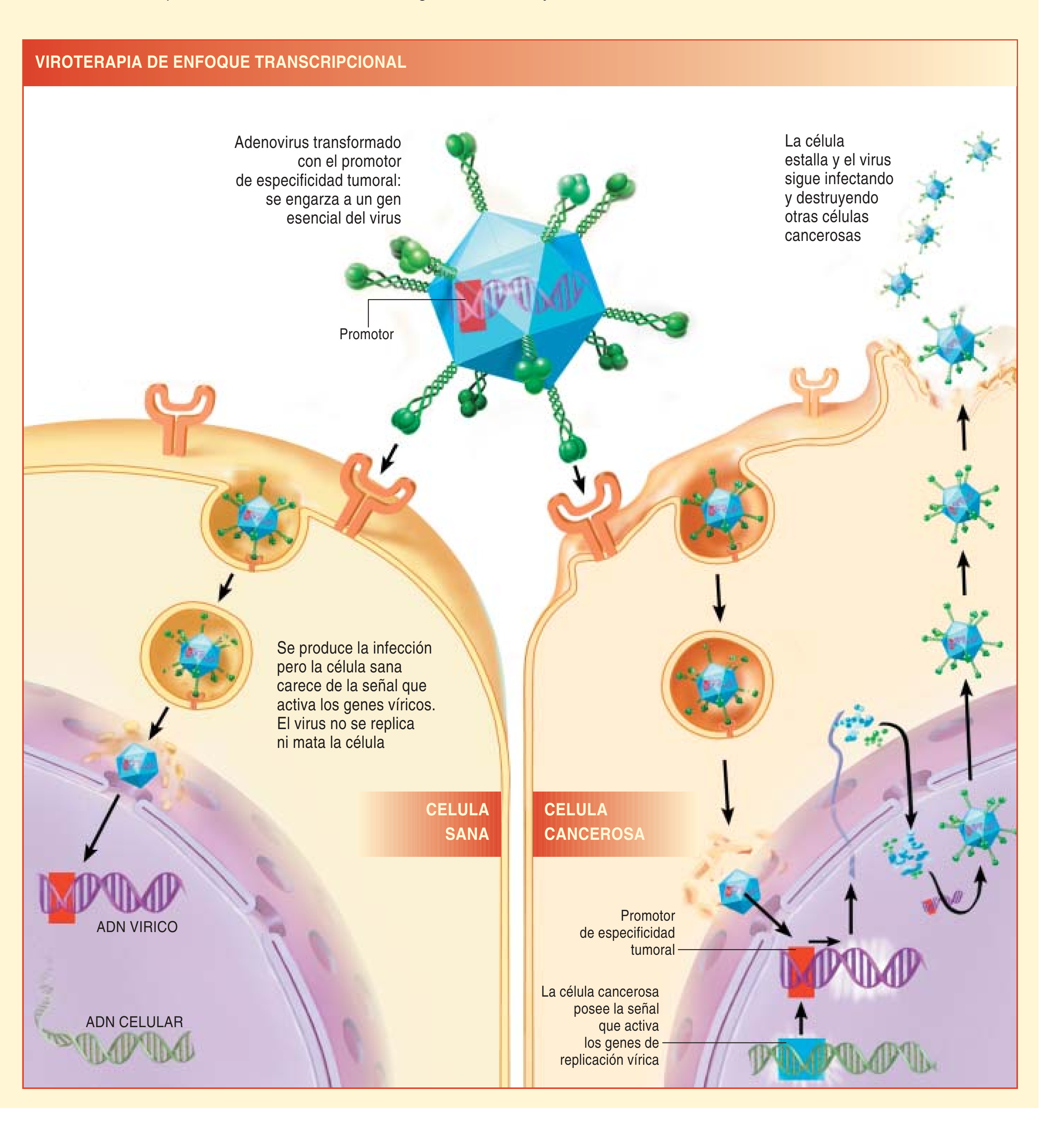
VIRUS QUE DESTRUYEN CELULAS CANCEROSAS

DOS METODOS FUNDAMENTALES para la viroterapia, la aplicación de la biología de los virus en el tratamiento del cáncer, se encuentran en fase de estudio. En el primero, el enfoque transduccional (*abajo*), se intenta transformar adenovirus, que en condiciones normales provocarían infecciones respiratorias, para que ataquen y destruyan sólo las células cancerosas. Para evitar que el virus penetre en las células sanas y sí, en cambio, se dirija a las tumorales, se agregan moléculas adaptadoras sobre la cápside proteica o se modifica directamente dicha cubierta.



TERESE WINSLOW

En el segundo método, denominado enfoque transcripcional (*abajo*), se inserta un promotor con especificidad tumoral cerca de uno de los genes esenciales del adenovirus. Este promotor, un fragmento de ADN, activa la transcripción del gen sólo en las células cancerosas. Los virus genéticamente modificados, aunque penetren en las células sanas, no pueden reproducirse en ellas ni, por tanto, destruirlas. Sin embargo, en cuanto los virus modificados se adentran en las células cancerosas, el promotor con especificidad tumoral les faculta para producir millones de copias de sí mismos hasta que la célula estalla. Pueden luego diseminarse y destruir otras células cancerosas.



(de la enzima que sintetiza la melanina) adyacente a los genes responsables de la replicación del virus. De este modo, aunque los adenovirus podrían infectar células normales, sólo se reproducen en el interior de los melanocitos, donde encuentran las proteínas necesarias para activar el promotor.

En nuestros días, se trabaja ya en la confección de adenovirus equipados con diversos promotores que limitan su actividad a determinados órganos o tejidos. En los tumores hepáticos, por ejemplo, el promotor del gen de la α-fetoproteína se reactiva; en condiciones normales, queda silente tras el desarrollo fetal. Los adenovirus que contienen ese mismo promotor constituyen una esperanza para la erradicación del cáncer de hígado. El grupo que dirige Jonathan W. Simons, de la Universidad Johns Hopkins, aplicó ese enfoque transcripcional en hombres cuyo cáncer de próstata había rebrotado después de someterse a radioterapia. Emplearon adenovirus, genéticamente manipulados por la compañía Cell Genesys, que contenían el promotor del antígeno específico prostático, una proteína que los tumores de próstata fabrican en desmesura. Administraron la viroterapia a veinte varones, en dosis diversas. Según los resultados publicados en 2001, ninguno de ellos sufrió efectos colaterales preocupantes; asimismo, los tumores de cinco de los hombres que recibieron las dosis más altas de viroterapia se redujeron al menos en un cincuenta por ciento.

Otras estrategias

Los enfoques transduccional y transcripcional podrían combinarse para mejorar la selectividad de los virus. Los adenovirus con el promotor de la enzima que sintetiza la melanina, por ejemplo, se replican también en melanocitos normales; por sí mismos, podrían, pues, crear manchas de despigmentación. Y los adenovirus, aptos para unirse a los receptores de membrana de las células tumorales, podrían también invadir una pequeña proporción de células sanas. Ahora bien, cabría esperar que los virus modificados para desempeñarse sin riesgo no dañaran las células normales. De momento, sin embargo, no se ha cosechado resultado alguno que demuestre que una combinación de estrategias afine la puntería del virus.

La viroterapia dirigida también presta especial atención a una de las características del cáncer: la división descontrolada de las células tumorales. Las células sanas sintetizan proteínas que frenan la división celular; en particular, la p53 y el retinoblastoma (Rb). Cuando las células se tornan cancerosas, sin embargo, los genes que codifican una u otra de estas proteínas mutan o quedan inactivos. Dado que sólo pueden replicarse en aquellas células que se preparan para dividirse, ciertos virus, incluidos los adenovirus, bloquean los mecanismos de freno de las células normales,

¿Una terapia segura?

EN NUMEROSAS VARIANTES de la viroterapia se emplean adenovirus. Hace cuatro años, causaron la muerte de un paciente en un ensayo clínico de terapia génica. En septiembre de 1999 Jesse Gelsinger, un muchacho de 18 años, murió después de recibir una inyección hepática de adenovirus. Padecía una forma leve de deficiencia de ornitina transcarbamilasa (DOTC), una enfermedad hepática hereditaria. Participaba en un ensayo clínico de una nueva terapia génica, que comportaba el empleo de un vector adenovírico para transportar, hasta las células hepáticas, una copia corregida del gen responsable de la DOTC. Por desgracia, cuatro días después de recibir una inyección de virus, murió a causa de un distrés respiratorio agudo y fallo multiorgánico. Al parecer, tales efectos secundarios letales derivaron de una reacción inmunitaria desproporcionada, desencadenada por el microorganismo administrado.

Aunque la muerte de Gelsinger ocurrió durante un ensayo clínico de terapia génica, la tragedia repercutió en el nuevo campo de la viroterapia. La terapia génica utiliza versiones alteradas de adenovirus y otros virus para introducir un nuevo gen en las células; la viroterapia emplea virus que se replican activamente (porten o no genes añadidos) para destruir tipos específicos de células. Ambas terapias, sin embargo, se apoyan con fuerza en los adenovirus.



JESSE GELSINGER. Murió en 1999 tras recibir una inyección de adenovirus. (Fotografía cedida por su familia.)

La autopsia de Gelsinger reveló que el adenovirus genéticamente modificado se había extendido al bazo, los ganglios linfáticos y la médula ósea. Del examen de su historia clínica se desprendía que, por el estado de avanzada degradación de la función hepática, el sujeto no debía haber participado en el ensayo. También se ha sugerido que la reacción inmunitaria pudo resultar de una infección anterior del enfermo con un adenovirus natural.

Desde la muerte de Gelsinger, se han multiplicado los esfuerzos para refinar el método de modificación génica del adenovirus con el fin de aumentar la inocuidad del mismo. Pero todavía no se conoce con certeza la causa de tal violenta reacción ante las inyecciones de adenovirus. Un segundo paciente del mismo ensayo clínico toleró la misma dosis adenovírica. Desde entonces docenas de personas en todo el mundo han recibido tratamientos similares sin sufrir ningún efecto colateral grave.

El informe del Instituto norteamericano de la Salud, emitido tras el fallecimiento de Gelsinger, recomienda el control estricto de los participantes en esos ensayos clínicos, antes y después de la administración de los virus terapéuticos. Estipula, además, que se descarten los voluntarios que padezcan cualquier predisposición que pudiera aumentar su sensibilidad a los virus.

MBR/KRT

ENSAYOS EN VIROTERAPIA

Compañía	Sede central	Virus	Enfermedades	Modificación del virus	Estado del ensayo clínico
BioVex	Abingdon, Oxfordshire, Reino Unido	Virus del herpes simple (VHS)	Cáncer de mama y melanoma	Transporta el gen del factor incentivante de la colonia de granulocitos y macrófagos, un incentivador del sistema inmunitario	Fase I/II
Cell Genesys	San Francisco del Sur California	Adenovirus	Cáncer de próstata	Dirigido contra las células del cáncer de próstata. Utiliza promotores específicos de próstata	Fase I/II
Crusade Laboratories	Glasgow	VHS	Glioma (cáncer del cerebro), cáncer de cabeza y cuello, melanoma	Una deleción, o pérdida de material genético, limita su actuación a las células en división incontrolada, como las cancerosas	Fase II para el glioma y el cáncer de cabeza y cuello; Fase I para el melanoma
MediGene	Martinsried, Alemania	VHS	Glioma y metástasis de cáncer de colon	Dos deleciones impiden su replicación en células normales	Fase II para el glioma; Fase I para la metástasis del cáncer de colon
Oncolytics Biotech	Calgary, Alberta, Canadá	Reovirus	Cáncer de próstata y glioma	Se replica sólo en células cancerosas con el oncogén *ras* activado	Fase II para el cáncer de próstata; Fase I/II para el glioma

NOTA: Los ensayos en Fase I evalúan la seguridad en un grupo reducido de pacientes. Las Fases II y III determinan la dosis adecuada y la eficacia, respectivamente.

mediante la síntesis de proteínas que inactivan el Rb o la p53.

A través de prácticas de ingeniería genética, se han obtenido adenovirus que no bloquean la acción de dichas proteínas. En células normales, que sintetizan tales frenos, se impedirá la replicación de los virus al inhibir la división celular. Pero sí se replicarán en células cancerosas —donde las proteínas Rb o p53 se encuentran incapacitadas— y las destruirán.

A los virus terapéuticos se les dota también de genes que aumentan la sensibilidad de las células por ellos infectadas a la quimioterapia. La técnica implica el corte y empalme de genes víricos que codifican enzimas capaces de convertir precursores inocuos, o "profármacos", en sustancias nocivas. En un ejemplo, publicado en 2002, André Lieber y sus colaboradores, de la Universidad de Washington, aplicaron esta táctica. Diseñaron adenovirus que portaban genes codificadores de enzimas capacitadas para convertir profármacos inocuos en camptothecin y 5-fluorouracilo. Prepararon los virus para que la síntesis de tales enzimas se produjera sólo en células de intensa división celular, como en los tumores. Inyectaron los virus y los "profármacos" en ratones a los que previamente habían implantado células cancerosas humanas de colon o de cuello uterino. Observaron que los virus se reproducían y se diseminaban por los tumores.

Pese a las promesas de futuro de las viroterapias, los clínicos necesitarán seguir el comportamiento de las mismas en el organismo del paciente para conocer su grado de eficacia y las posibles correcciones a que hubiere lugar. De ahí la importancia del trabajo conjunto de los investigadores en viroterapia y los radiólogos con el fin de establecer nuevas técnicas de formación de imágenes.

Las técnicas de formación de imagen requieren la inserción, en el virus o en la célula infectada, de un gen que gobierna la producción de una molécula trazadora. Este marcador consiste en una proteína fluorescente que se observa directamente o bien en una molécula que se une a los radionúclidos empleados en las técnicas radiológicas habituales. La proteína fluorescente podría funcionar mejor en cánceres accesibles por endoscopia, el de laringe por ejemplo. A través de la observación endoscópica, los clínicos advertían, guiados por la fluorescencia, dónde se encuentran los virus y, por ende, las células cancerosas. Sin embargo, los virus que mejor han respondido a esta técnica hasta el momento son los que no matan las células.

En 1995 el pionero de la terapia génica W. French Anderson, de la facultad de medicina de la Universidad de California del Sur, conjeturó en esta misma revista que para el año 2000 se estaría ya ensayando con las primeras versiones de vectores inyectables y capaces de llegar a las células deseadas. Y lo cierto es que estas pruebas comenzaron en el momento predicho, antes de lo que algunos imaginaban. Nos encontramos ante un futuro lleno de esperanzas para los virus terapéuticos en la medicina del siglo XXI.

Bibliografía complementaria

GENE THERAPY: DESIGNER PROMOTERS FOR TUMOUR TARGETING. D. M. Nettelbeck, V. Jérôme y R. Müller en *Trends in Genetics*, vol. 16, págs. 174-181; 2000.

REPLICATIVE ADENOVIRUSES FOR CANCER THERAPY. R. Alemany, C. Balagué y D. T. Curiel en *Nature Biotechnology*, vol. 18, págs. 723-727; 2000.

VECTOR TARGETING FOR THERAPEUTIC GENE DELIVERY. Dirigido por D. T. Curiel y J. T. Douglas. John Wiley & Sons, 2002.

CYTOLYTIC VIRUSES AS POTENTIAL ANTI-CANCER AGENTS. C. J. A. Ring en *Journal of General Virology*, vol. 83, págs. 491-502; 2002.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Mezclas frigoríficas

La transformación de un sólido en líquido (licuefacción) y de un líquido en vapor (vaporización) absorbe calor. Ese calor "latente" se toma del ambiente, con lo que éste se enfría. Para aprovechar esta propiedad a fin de producir frío y conservarlo, las sustancias que cambian de estado deben ser de obtención fácil, baratas e inofensivas; además, las temperaturas de los cambios de estado han de ser próximas a las empleadas en la refrigeración. Ningún cuerpo puro cumple con esos criterios; los frigoristas consiguen el mejor compromiso con ciertas mezclas binarias especiales: los azeótropos y los eutécticos.

En la cadena del frío, un fluido refrigerante extrae el calor de un recinto y lo evacua al exterior. Líquido al principio, se vaporiza parcialmente en el descompresor, y luego llega al evaporador, donde acaba de cambiar de estado. Absorbe así el calor del recinto. Comprimido, se lo introduce a continuación a alta presión en el condensador, donde cede el calor a un radiador, antes de volver al estado líquido. Luego, se reinicia el ciclo.

O sea, un frigorífico aprovecha el calor latente del refrigerante, que es la cantidad de calor necesaria para vaporizarlo. Así, el amoniaco hierve a –33 ºC a una atmósfera de presión; el calor latente de vaporización de un gramo es de 1300 joules, mucho mayor que el "calor sensible" intercambiado durante una variación de temperatura sin cambio de estado físico: para rebajar 60 grados (de 25 ºC a –33 ºC) la temperatura de un gramo de NH_3 gaseoso basta con 130 joules.

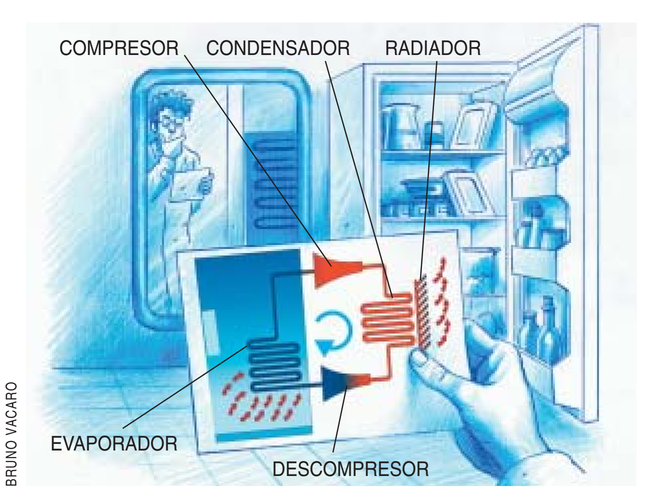
Un buen refrigerante debe pasar de líquido a vapor a una presión mayor que la atmosférica y a una temperatura menor que 0 ºC. Químicamente estable, no debe ser tóxico.

El amoniaco es un cuerpo puro dotado de las propiedades físicas adecuadas; pero, como es tóxico, su empleo se ha ido prohibiendo. Otro cuerpo puro, el diclorodifluorometano (CCl_2F_2) sería un líquido refrigerante ideal si no fuera uno de los halocarburos que destruyen la capa de ozono. Como no hay cuerpo puro que cumpla con el "pliego de prescripciones", los frigoristas han recurrido a las mezclas dobles.

La ayuda de los destiladores

La evaporación de una mezcla binaria es un fenómeno más complejo que la de un cuerpo puro, pues los componentes poseen volatilidades distintas. Los destiladores aprovechan esa diferencia para obtener "alcoholes fuertes". El etanol (el alcohol por antonomasia) es más volátil que el agua. A la presión atmosférica, hierve a 78,4 ºC, temperatura claramente inferior a 100 ºC. Por ello, el vapor que efluye de una mezcla alcohólica llevada a la ebullición, vino por ejemplo, está enriquecido en alcohol.

Los destiladores, una vez cosechados y prensados los frutos, dejan fermentar el mosto obtenido durante varias semanas. El caldo que resulta contiene del orden de un 5 % de etanol, pero produce un vapor "del 40 %", es decir, ocho veces más rico en alcohol que el líquido destilado. Esa proporción disminuye después a medida que el caldo se empobrece en alcohol. A la vez, su temperatura de ebullición aumenta y se acerca a la del agua, 100 ºC. Al empezar la destilación, la temperatura de ebullición es de 90 ºC (5 % de alcohol en el caldo). El destilador detiene la ebullición cuando la temperatura de ebullición llega a 95 ºC, pues la proporción de alcohol en el vapor producido baja a menos del 20 % (2,5 % de alcohol en el caldo).



1. En los frigoríficos, el calor interno se absorbe merced a la vaporización de un fluido. Este, una vez gasificado, es transportado al exterior, donde cede el calor antes de sufrir una compresión y una condensación



2. La destilación de un caldo alcohólico produce una nueva mezcla más rica en alcohol. El mismo fenómeno se produce en los circuitos de refrigeración cuando en ellos se introducen mezclas mal proporcionadas



BRUNO VACARO

3. Las botellas congeladas que refrigeran una neverita van rellenas de una salmuera eutéctica

Los azeótropos, remedos de cuerpos puros

Preciosa para los destiladores, la azeotropía es un mecanismo molesto para los frigoristas. El evaporador funciona como un alambique y "destila" la mezcla binaria que sirve de fluido enfriador. Este se empobrece en su componente más volátil. La composición del refrigerante varía de un punto a otro del circuito, lo que modifica las temperaturas de funcionamiento. Además, intercambios gaseosos intempestivos tienden a restablecer en el circuito una mezcla de proporción uniforme. Se degrada el rendimiento térmico.

Esos desarreglos se evitan si se emplean ciertas mezclas binarias que, como los cuerpos puros, tienen una temperatura de ebullición constante. Las proporciones de las mezclas binarias llamadas azeótropos (del griego *zein*, hervir) están definidas exactamente. Es ilustrativo el caso de la mezcla de agua y etanol: para obtener un alcohol de 55 grados, los destiladores practican una segunda destilación a partir del destilado de la primera. En general se detienen ahí, pero en las destilerías productoras de alcohol medicinal, las destilaciones se encadenan para hacer subir el grado alcohólico en el destilado. Sin embargo, por muchos que sean los ciclos, la mezcla obtenida no sobrepasa el 95 % de alcohol.

¿Por qué? A esa concentración precisa, el vapor de destilación contiene tanto alcohol como la mezcla alcohólica destilada. La destilación ya no modifica las proporciones de la mezcla, y ésta hierve a temperatura constante como un cuerpo puro, o sea, es un azeótropo. En el caso del azeótropo agua/etanol, la temperatura de ebullición del líquido es de 78,15 ºC.

Los frigoristas emplean azeótropos porque les garantizan una composición uniforme en todo el circuito de enfriamiento y poseen una temperatura de cambio de fase fija. Han conseguido numerosos fluidos de enfriamiento interesantes con los halocarburos inofensivos para la capa de ozono. Muy empleado en los cámaras frigoríficas, el "AZ-50" es un azeótropo obtenido a partir de los hidrofluorocarburos C_2HF_5 y $C_2H_3F_3$ mezclados a partes iguales. A una atmósfera, hierve hacia –47 ºC.

Guárdese en frío

El frío producido, los frigoristas procuran conservarlo. Su propósito es mantener constante la temperatura de la cámara frigorífica, sin que para ello el sistema de refrigeración tenga que funcionar constantemente. De nuevo, la solución consiste en aprovechar un cambio de estado. Mas, para ganar espacio (un gas ocupa mucho), los frigoristas hacen uso de la transición sólido/líquido. El hielo es eficaz para mantener un espacio a 0 ºC. Su calor latente de licuefacción es de 333 joules por gramo, valor considerable respecto a muchos otros sólidos. Así, mientras queda hielo en la cámara, el calor que en ella penetra sirve para fundirlo y no para elevar la temperatura. Para mantener las cámaras frigoríficas a la temperatura de congelación, los frigoristas necesitan sólidos que se licúen por debajo de –18 ºC. Una vez más, recurren a las mezclas.

El agua salada parece un buen candidato; su temperatura de congelación es inferior a 0 ºC. Sin embargo, no es lo mejor, pues no se hiela como un cuerpo puro: al congelar agua de mar, por ejemplo, se obtienen cristales de hielo que flotan en una salmuera más concentrada en sal. A medida que avanza la congelación, aumenta la concentración salina y disminuye la temperatura. Al revés, la temperatura de una "salmuera congelada" aumenta durante su fusión. Una mezcla así no sabría mantener una cámara a temperatura constante.

Concentración límite

Resaltemos que durante la congelación del agua salada, las dos fases presentes son de composiciones distintas y que, como en una destilación, la temperatura evoluciona a lo largo de todo el proceso. ¿Qué mezclas desempeñan en la congelación el papel de los azeótropos en la destilación? Respuesta: los eutécticos (del griego *eutektos*, que se funde fácilmente), unas mezclas que se congelan como los cuerpos puros. Al igual que éstos, los eutécticos mantienen una temperatura y una composición constantes durante el cambio de estado. El más conocido de los eutécticos es una salmuera que contiene 22,4 % de cloruro sódico en masa y se congela a –21,6 ºC. A tan fuerte concentración, se hiela en masa, dando un "helado de sal" de la misma composición que el líquido, y no ya hielo puro. Con agua y sales diversas se consiguen eutécticos de diferentes temperaturas de congelación. Por ejemplo, una solución de cloruro potásico al 19,5 % se congela hacia –10 ºC.

Los eutécticos no son más familiares en la forma de botellas aplastadas cuyo contenido se solidifica en el congelador antes de llevárnoslas de excursión en el fondo de la nevera portátil. Por lo que respecta a los profesionales del frío, emplean placas eutécticas en las cámaras frigoríficas a fin de espaciar los períodos de funcionamiento del circuito de enfriamiento. Gracias a ellas, la temperatura de la cámara permanece constante mientras subsista eutéctico sólido no fundido.

Juan M.R. Parrondo

La frecuencia fantasma

La mayoría de las lectoras y lectores de *Investigación y Ciencia* probablemente conozcan algunas ilusiones ópticas. Lo que quizá no resulte tan conocido es que también existe un buen número de ilusiones auditivas.

La escala de Shepard y la de Risset, por ejemplo, son los análogos acústicos a las escaleras sin fin de Escher, en las que se puede volver al punto de partida bajando siempre escalones. La escala de Shepard consiste en una serie de notas que, al tocarse de forma cíclica, dan la sensación de formar una escala siempre ascendente o siempre descendente. La escala de Risset es la versión continua de la de Shepard, es decir, un sonido cuya altura parece aumentar indefinidamente, a pesar de ser estrictamente periódico. En Internet se pueden encontrar varias demostraciones de estas escalas y de otras ilusiones acústicas.

Una ilusión acústica más simple es la llamada “fundamental inexistente”. Para entender en qué consiste, conviene recordar qué características definen un sonido, especialmente un sonido musical, y cómo son percibidas. Cuando oímos una nota musical, distinguimos entre el timbre y la altura de la nota, es decir, si se trata de un *do* de la escala central del piano o de un *fa* dos octavas más arriba, por ejemplo. Cualquier sonido se puede descomponer en una suma de los llamados *tonos puros*, unas oscilaciones perfectamente periódicas y cuya expresión matemática es del tipo sen $(2\pi\upsilon t)$, en donde υ es la frecuencia del tono puro. La mayoría de los instrumentos musicales emiten sonidos que constan de varios tonos puros llamados armónicos y cuyas frecuencias son múltiplos de una dada que se llama *fundamental*. Por ejemplo, el sonido de una flauta tocando el *la* de la octava central del piano consta de una fundamental de 440 hertz, es decir, un tono puro que oscila 440 veces por segundo, y de sus sucesivos armónicos: $440 \times 2 = 880$, $440 \times 3 = 1320$, $440 \times 4 = 1760$, etc. La intensidad de cada uno de estos armónicos es menor cuanto más alto es el armónico. El timbre de un instrumento está precisamente determinado por las intensidades de estos armónicos. El *la* de una flauta y el *la* de un clarinete constan de la misma fundamental y de los mismos armónicos. Por eso identificamos la misma nota en ambos sonidos. Sin embargo, las intensidades de los armónicos son distintas en cada instrumento y es eso lo que hace que tengan timbres diferentes.

Un sonido como este:

$$\text{sen}(2\pi \times 440 \times t) + 0{,}5\,\text{sen}(2\pi \times 880 \times t) + 0{,}5\,\text{sen}(2\pi \times 1320 \times t)$$

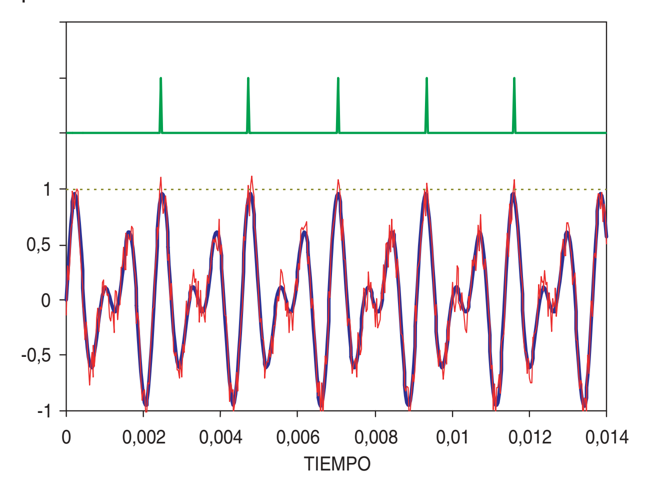
suena parecido a un órgano de iglesia tocando el *la*. Consta de la fundamental de 440 hertz más los dos siguientes armónicos con una intensidad mitad de la intensidad de la fundamental.

Lo sorprendente es que, si eliminamos la fundamental y nos quedamos con:

$$0{,}5\,\text{sen}(2\pi \times 880 \times t) + 0{,}5\,\text{sen}(2\pi \times 1320 \times t)$$

el oído humano sigue percibiendo este sonido como un *la* de la octava central. Esta es la ilusión de la fundamental inexistente. A pesar de no estar presente en el sonido, la fundamental se puede oír. Esta ilusión acústica es la que nos permite identificar la melodía de una canción en el teléfono. En efecto, la línea telefónica y el micrófono o el altavoz del auricular no son capaces de transmitir o reproducir frecuencias bajas. En consecuencia, lo que oímos al teléfono es un sonido en el que se han eliminado esas frecuencias bajas, entre las que suelen estar las fundamentales de la melodía. Sin embargo, la ilusión de la fundamental inexistente nos permite reconstruir las fundamentales e identificar sin problemas la melodía. Lo sabían hace más de 200 años los constructores de órganos, que en lugar de construir grandes tubos para las notas más bajas, los sustituían por pares de tubos más pequeños cuyo sonido corresponde a los dos primeros armónicos de la nota que se quiere reproducir.

Hay varias teorías que han tratado de explicar esta ilusión acústica. Hace poco más de un mes se ha publicado la más reciente, propuesta por Dante Chialvo. Utiliza una variante de la *resonancia estocástica*, un fenómeno al que en esta misma sección dedicamos el artículo *Ruidos reveladores*, en junio de 2002, y que muestra cómo añadiendo ruido a una señal se puede mejorar la percepción de la misma. Dante Chialvo ha demostrado que la resonancia estocástica puede hacer que se detecte la fundamental inexistente.



1. La curva azul es la representación de un sonido compuesto por dos tonos puros de 880 y 1320 hertz, es decir, el primer y segundo armónicos del la *central, de 440 hertz. La curva roja representa este sonido al que se la ha añadido un ruido, es decir, un número aleatorio entre –0,2 y 0,2. En verde se muestra la respuesta de una neurona cuyo umbral de disparo es 1; umbral también representado en la figura por la línea horizontal punteada*

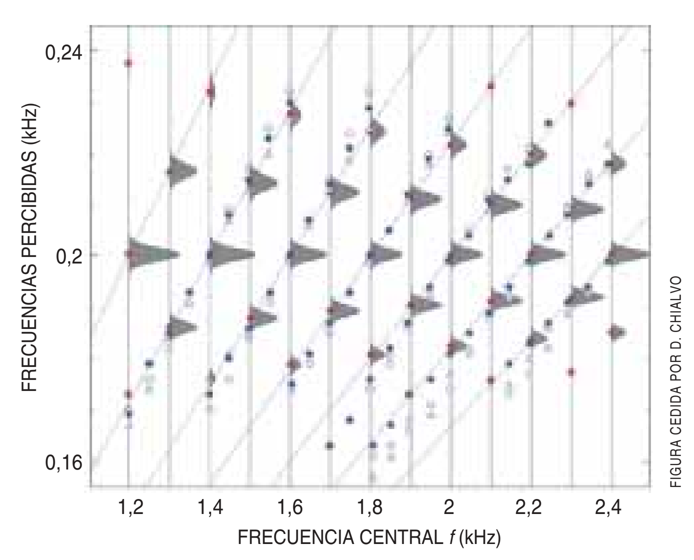


FIGURA CEDIDA POR D. CHIALVO

2. En el experimento de Schouten tres individuos escuchaban un sonido compuesto por tres tonos puros de frecuencias f – 200, f y f + 200 hertz. Los círculos azules y los triángulos y círculos blancos representan las respuestas de los tres individuos ante los sonidos mostrados. Las campanas grises indican la probabilidad con que la neurona de Chialvo se excita a una frecuencia dada y los puntos rojos son los máximos de esta probabilidad

En la figura 1 se muestra en azul la representación gráfica del sonido correspondiente a la última fórmula, es decir, el sonido con los dos armónicos de frecuencias 880 y 1320 hertz y sin la fundamental de 440. A este sonido se le añade un ruido, que no es más que un número aleatorio ente –0,2 y 0,2. El resultado es la curva roja de la figura, bastante irregular. La teoría de Chialvo supone que esta señal con ruido llega a una neurona y que ésta responde de la siguiente forma: si la señal con ruido supera cierto umbral (*1 en la figura*), se excita (o dispara). La neurona tarda un cierto tiempo (aquí 0,3 milisegundos, un poco distinto del tomado por Chialvo) en poder excitarse de nuevo. La curva verde muestra los disparos obtenidos en una simulación de este modelo. Como puede verse en la figura, la neurona, gracias al ruido, se excita en los picos de la onda (aunque no en todos), que están separados exactamente por 1/440 segundos. Es decir, la frecuencia de estos picos y, por tanto, la frecuencia de los disparos de la neurona, es precisamente la de la fundamental inexistente, es decir, 440 hertz. Como vemos, la neurona detecta, gracias al ruido, la frecuencia de la fundamental inexistente.

Sin embargo, el lector suspicaz habrá pensado que, en este ejemplo, el ruido es innecesario. Bastaría reducir un poco el umbral de la neurona, hasta 0,9 por ejemplo, para que detectara los picos a la frecuencia de la fundamental. Para este ejemplo concreto, esa objeción es cierta y, de hecho, la teoría de que la altura del sonido se percibe detectando la frecuencia de los picos de la señal sin necesidad de ruido se remonta a 1940 y se debe a J. F. Schouten. Sin embargo, la propuesta de Chialvo explica peculiaridades de la percepción de la altura de un sonido que sí necesitan el ruido que se añade a la señal.

Cuando se reproduce un sonido que es suma de dos tonos puros que no son armónicos de una fundamental, el oído sigue reconociendo una única nota. En este caso la percepción es más compleja. Hay, por ejemplo, sonidos antes los cuales el oído puede percibir dos notas diferentes. Se percibe una u otra dependiendo de qué es lo que se haya oído antes. La teoría de Chialvo sí puede explicar este fenómeno gracias al ruido. En la figura 2, se comparan los experimentos realizados por Schouten en 1940 con el modelo que acabamos de describir. En el experimento de Schouten, tres individuos escuchan varios sonidos, todos ellos compuestos por tres tonos puros de frecuencias $f - 200$, f y $f + 200$ hertz (estos tres tonos sólo son armónicos de una fundamental si f es múltiplo de 200 hertz) y se les pide que identifiquen a qué nota musical corresponde cada sonido. El resultado se puede ver en la gráfica de la figura 2, en donde se muestran con círculos blancos y azules y triángulos blancos las respuestas de las tres personas. Observen que hay sonidos para los cuales un mismo individuo ha identificado dos notas distintas. Normalmente, si se parte de un sonido compuesto por armónicos de una fundamental, por ejemplo, si se suman tres tonos puros con frecuencias 1400, 1600 y 1800 hertz ($f = 1600$ en la gráfica), el oyente identificará la fundamental inexistente, es decir, 200 hertz, tal y como muestra la gráfica. Si, a partir de este sonido, aumentamos en paralelo las tres frecuencias, entonces la nota percibida subirá y, si descendemos las frecuencias, descenderá la nota. Pero lo mismo ocurre si partimos de un sonido con $f = 1400$ hertz. Por eso se aprecian en la figura distintas ramas, cada una de las cuales corresponde a una serie de sonidos que se encuentran alrededor de uno compuesto por tres armónicos de 200 hertz y que es percibido como una nota de 200 hertz. Finalmente, las campanas grises indican la probabilidad con la que la neurona propuesta en la teoría de Chialvo se excita a una frecuencia dada y los puntos rojos son los máximos de esta probabilidad. Por lo tanto, los puntos rojos son en realidad las frecuencias que la neurona detecta o puede detectar. No olvidemos que el modelo contiene ruido y, en consecuencia, un cierto grado de aleatoriedad. Como vemos, el acuerdo entre la teoría y el experimento es bastante bueno. En realidad, las distintas ramas del experimento de Schouten pueden reproducirse con otras teorías. Una teoría previa de J. H. Cartwright, D. L. González, y O. Piro, físicos de la Universidad de las Islas Baleares, da lugar a las mismas predicciones que la neurona de Chialvo utilizando osciladores no lineales. La ventaja del modelo de Chialvo es su sencillez y también que permite explicar la ambigüedad en la percepción de la altura del sonido ya que, al introducir aleatoriedad en la percepción, el oyente puede detectar una u otra nota con unas ciertas probabilidades. Tanto este modelo como los que comentamos en el artículo de la resonancia estocástica, indican que el ruido y el azar son cada vez más relevantes para entender la percepción y otros fenómenos cognitivos.

Mark Fischetti

CLAVOS Y GRAPAS

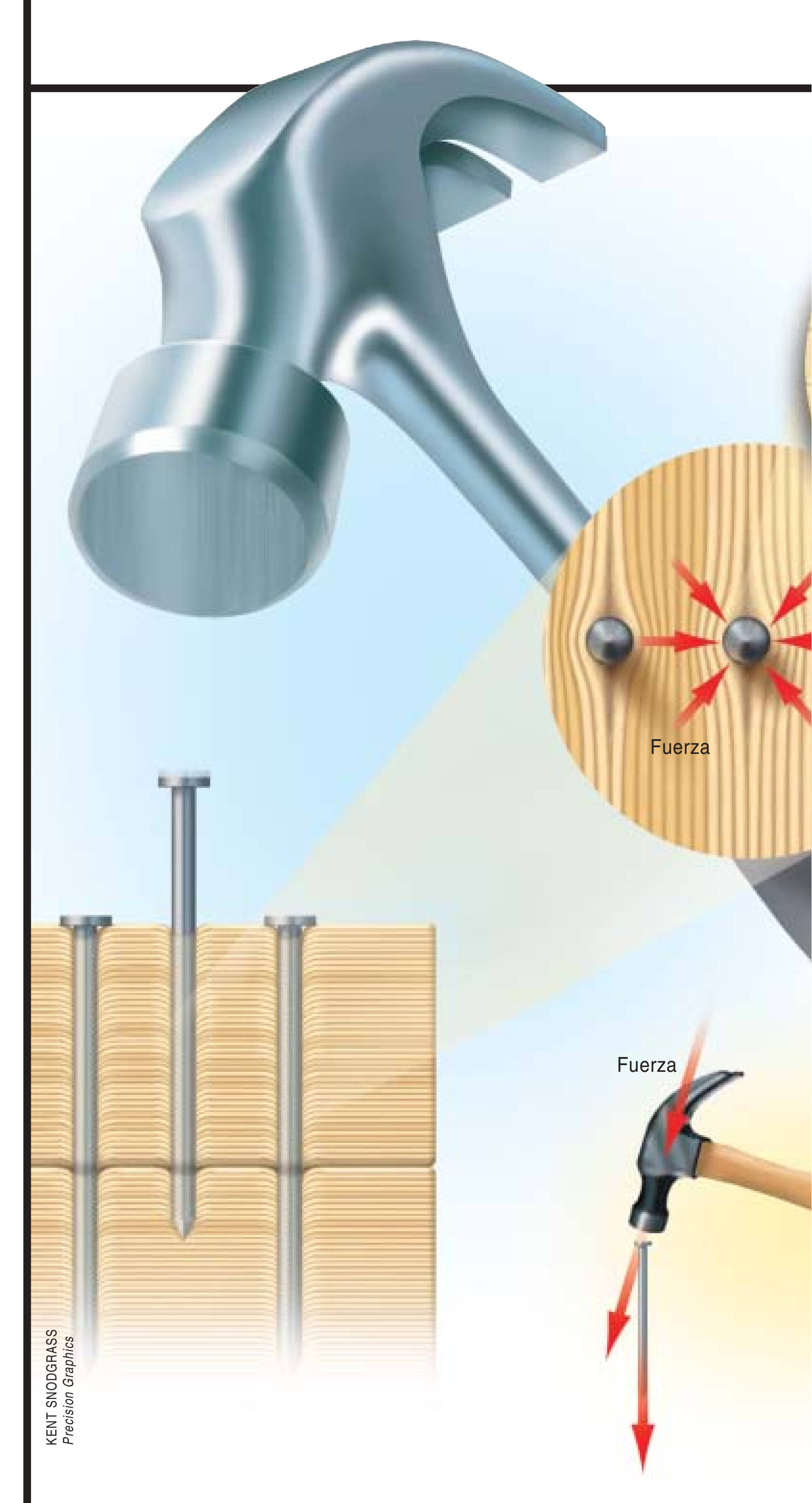
Cómo aguantan

Las cualidades de los clavos han sido objeto de estudio desde la época romana. Pero su uso doméstico no se generalizó hasta los últimos cien años. Durante siglos, los herreros fabricaban los clavos uno por uno. Estiraban una barra de hierro al rojo, afilaban una punta con un martillo y golpeaban la otra para ensancharla y formar la cabeza. Como resultado, los clavos se vendían a un precio considerable. A fines del siglo XVIII, se idearon artefactos manuales que recortaban clavos en placas de hierro. En el decenio de 1880, las máquinas de vapor aceleraron el proceso y, por tanto, lograron reducir los costes.

La historia del clavo cambió de nuevo en el transcurso del primer decenio del siglo XX, cuando se consiguieron aceros flexibles a la vez que resistentes. Las máquinas cortan los clavos y forman la punta y la cabeza en una sola operación a partir de un largo carrete de alambre de acero. Este proceso permite fabricar numerosos tipos de puntas y espigas que mejoran las cualidades de los clavos.

El simple rozamiento sobre la espiga del clavo mantiene unidas dos piezas de madera e impide que el clavo se afloje cuando las vibraciones y los cambios en la temperatura y la humedad dilatan y contraen las fibras de la madera. Los mismos principios de sujeción y técnicas de fabricación valen para las grapas: en esencia, dos clavos unidos por un travesaño. Para favorecer la inmovilidad del clavo, los fabricantes pueden grabar pequeños hoyos en lo que aparenta ser una espiga lisa o añadir anillos o aristas, todo para asir mejor las fibras. Asimismo, ciertos revestimientos, como las resinas, pueden aumentar el rozamiento.

Si bien sencilla, la física de los clavos resulta potente y les convierte en útiles de vital importancia. A principios del siglo XVII, el poeta inglés George Herbert recordaba el valor de un clavo en su poema *Jacula Prudentium* (las tres primeras líneas que siguen), ampliado más tarde por autores desconocidos (las dos últimas líneas): “Por falta de un clavo se pierde una herradura/Por falta de una herradura se pierde un caballo/Por falta de un caballo se pierde un jinete/Por falta de un jinete se pierde una batalla/Por perder una batalla se pierde un reino.”



KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **4 d, 8 d, 12 d:** Hace siglos, los clavos eran manufacturados por los herreros. Su precio resultaba elevado. Los carpinteros compraban 100 clavos de una pulgada por dos peniques, abreviadamente "d". Cien clavos de tres pulgadas costaban 10 d. En su momento, el precio del centenar se tomó como indicador de las dimensiones de los clavos comunes, desde 2 d hasta 60 d (seis pulgadas). La norma persiste hoy en los países que no utilizan el sistema métrico. Los clavos más cortos que 2 d equivalen a las puntillas y los más largos que 60 d corresponden a los clavos de bellota y de pie.

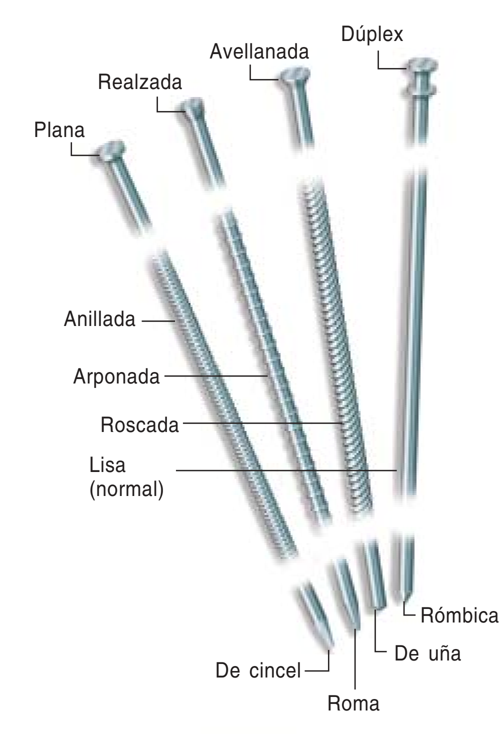
➤ **SIN ESTANDARES:** "d" no constituye ningún indicador de la calidad. El clavo 10 d de la marca X puede ser mejor que el de la marca Y, pues el acero que se utiliza en su fabricación varía mucho. Por su parte, la industria ha mostrado poco interés en estandarizar la resistencia del acero a la flexión. Cada cliente encarga los clavos que más le convienen en función del contenido en carbono del acero: cuanto más carbono, mayor resistencia a la tracción y mayor coste.

➤ **CORROSION:** La lluvia oxida las cabezas de los clavos. Así aparecen manchas en paredes y tejados, a menos que se empleen clavos de acero inoxidable, aluminio o galvanizados. Tratada con arseniato de cobre amoniacal o arseniato de cobre cromado, la madera inyectada a presión, tan usada para pisos, resiste la putrefacción. Esos compuestos corroen el acero y el zinc; los clavos de cobre, bronce y acero inoxidable, en cambio, aguantan mejor.

1. EL CLAVO FLEXIONA los alvéolos de la madera en la dirección de penetración de la espiga. Sacar el clavo requiere la fuerza suficiente para revertir la flexión de los alvéolos. Un clavo más largo o ancho ofrece mayor superficie y, por tanto, más resistencia a la retracción.

Fuerza

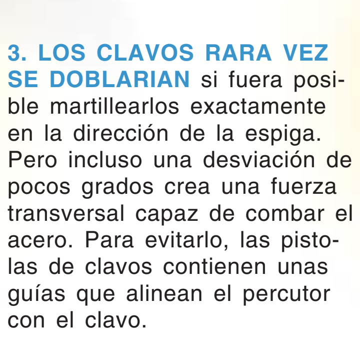
2. EL CLAVO SEPARA las fibras de la madera. Se comprimen y aumenta así la presión contra el clavo, que se mantiene en posición merced a un gran rozamiento. Un clavo más largo o ancho genera más compresión y por ello una mayor sujeción.



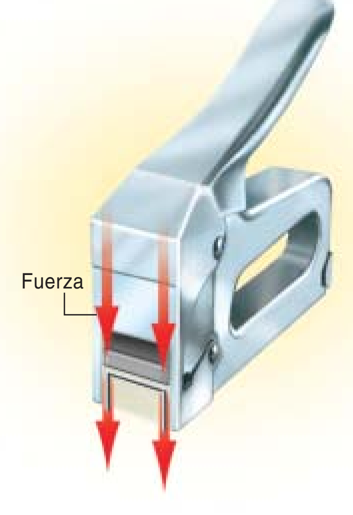
4. LAS CABEZAS PLANAS añaden sujeción y facilitan el martilleo. Las cabezas realzadas y las avellanadas se incrustan y se cubren por motivos estéticos; las dúplex se emplean en andamiajes.

5. LAS ESPIGAS ANILLADAS, ARPONADAS O ROSCADAS tienen menos tendencia a aflojarse que las espigas lisas normales, ya que las deformaciones se agarran a las fibras de la madera.

6. LAS PUNTAS AGUDAS SEPARAN limpiamente las fibras, lo que favorece la sujeción pero tiende a disgregar la madera. Las puntas romas aplastan las fibras, lo que reduce la disgregación pero también la sujeción. Las puntas rómbicas ofrecen una opción intermedia.



3. LOS CLAVOS RARA VEZ SE DOBLARIAN si fuera posible martillearlos exactamente en la dirección de la espiga. Pero incluso una desviación de pocos grados crea una fuerza transversal capaz de combar el acero. Para evitarlo, las pistolas de clavos contienen unas guías que alinean el percutor con el clavo.



7. UNA GRAPA SE DOBLA con un simple dedo, a menos que se clave mediante una grapadora. Sus guías alinean el percutor con los brazos de la grapa y los canales impiden que éstas se tuerzan.

LIBROS

Circumnewtoniana

Créditos y réditos

THE CAMBRIDGE COMPANION TO NEWTON. Dirigido por I. Bernard Cohen y George E. Smith. Cambridge University Press; Cambridge, 2002.

LONDON'S LEONARDO. THE LIFE AND WORK OF ROBERT HOOKE, por Jim Bennett, Michael Cooper, Michael Hunter y Lisa Jardine. Oxford University Press; Oxford, 2003.

ALCHEMY TRIED IN THE FIRE. STARKEY, BOYLE, AND THE FATE OF HELMONTIAN CHYMISTRY, por William R. Newman y Lawrence M. Principe. The University of Chicago Press; Chicago, 2002.

LEONHARD EULER. LETTRES À UNE PRINCESSE D'ALLEMAGNE SUR DIVERS SUJETS DE PHYSIQUE ET DE PHILOSOPHIE. Presses Polytecniques et Universitaires Romandes; Lausanne, 2003.

DIE WERKE VON DANIEL BERNOULLI. Tomo 5. Edición y comentarios de Gleb K. Mikhailov. Birkhäuser Verlag; Basilea, 2002.

Hay títulos que compendian contenido y propósito. También en ello anduvo por delante Isaac Newton (1642-1727). Su obra capital, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, se superponía, desde el dintel, al libro de René Descartes *Principia Philosophiae*. El inglés iba a exponer ciencia, que sustituyera al andamio figmentario del mecanicismo antiaristotélico propuesto por el francés (*The Cambridge Companion to Newton*). La ciencia, en tiempos de Newton, se inscribía en el dominio de la filosofía natural. El, además, dejaba de lado cualquier postulado ontológico para ceñirse a una visión del mundo donde sólo operaban fuerzas y partículas de materia, sometidas al crisol de la observación y experimentación. Ni siquiera tenían cabida átomos o vacío, por la sencilla razón de que carecían de peso. Estaba, en efecto, familiarizado con la filosofía de Pierre Gassendi y Walter Charleton.

Newton inicia su formación superior en el Trinity College de Cambridge, donde ingresa en 1661. Se comparte allí la docencia de Aristóteles con la de Kepler y otros contemporáneos. Asiste a las clases de matemáticas de Isaac Barrow. En lecturas complementarias estudia la *Géometrie* de Descartes. Cerrada la universidad en 1665 por una epidemia de peste, aprovecha el intervalo para ahondar en matemática e introducirse en los experimentos de óptica. Con tal éxito, que por esos años desarrolló los fundamentos del cálculo diferencial e integral, incluido el teorema que los asocia. A esa época pertenecen sus ensayos sobre la reflexión y el color. De mediados de los sesenta son también sus primeras lucubraciones sobre el movimiento circular uniforme, que fructifican en el descubrimiento de la regla v^2/r, unos años antes de que Christiaan Huygens la publicara en *Horologium Oscillatorium*.

De vuelta al Trinity tras el flagelo, se licenció en 1668; al poco se le nombra profesor Lucasiano de matemáticas, cátedra que ocupó hasta 1701. Siguió investigando en matemática (redacta *De analisi*, por series infinitas, que circula entre los eruditos británicos y contiene sus principales hallazgos en el cálculo) y óptica, al tiempo que extiende sus intereses al campo de la química y alquimia. Tardo en publicar, entre 1672 y 1676 aparecen sólo una serie de cartas sobre la teoría de la luz y los colores, incluyendo la invención de un telescopio reflector, editadas en las *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Una muestra muy escasa de su ingente labor escrita en ese intervalo. Por norma estatutaria sus lecciones de clase debían depositarse en la biblioteca de la universidad; las de álgebra se publicarían a principios del siglo XVIII; otras se han rescatado en fecha reciente. Tan tenaz cuan profundo, continuaba a lo largo del decenio de los setenta y principios de los ochenta, junto con las materias oficiales de docencia, su inquisición en química, cronología, profecía y teología, así como en física.

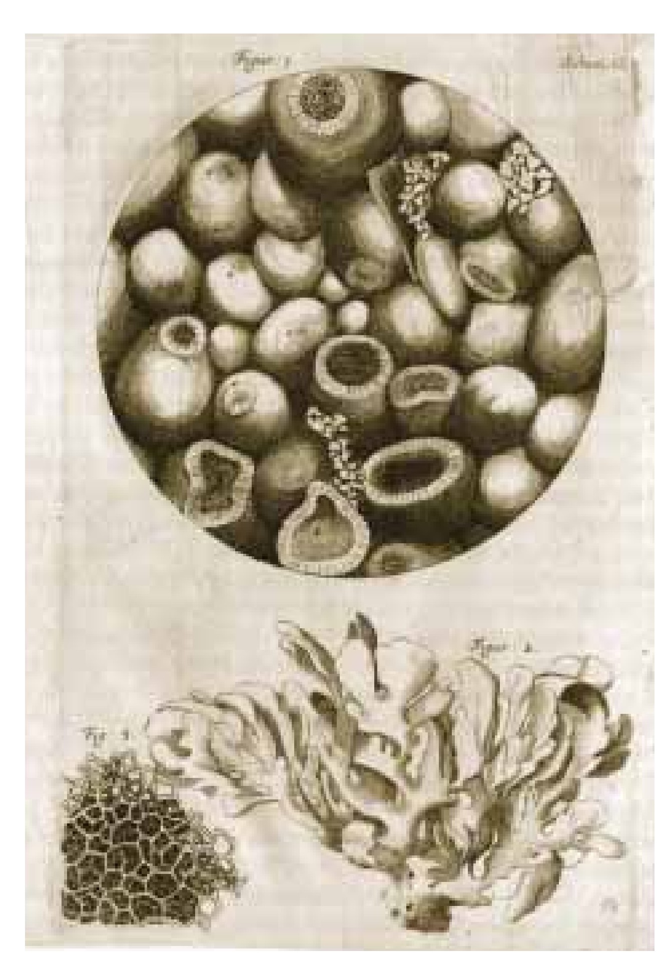
En el verano de 1684, Edmond Halley visitaba a Newton en Cambridge para preguntarle sobre una cuestión irresuelta: ¿qué trayectoria curva describe una fuerza del cuadrado inverso? A lo que éste repuso: la curva generada por una fuerza del cuadrado inverso es una elipse. Y le envió, más tarde, un manuscrito, el *De motu corporum in gyrum*. Su desarrollo se completó en los *Principia*, publicados en 1687. Según parece, Newton venía pensando ya desde los años sesenta sobre la posibilidad de que la gravedad terrestre se extendiera, en una razón del inverso del cuadrado, a la Luna. Pero las pruebas que nos lo muestren ocupado en una teoría de la gravitación universal se retrasan hasta finales de 1684 o comienzos de 1685, durante su revisión del tratado *De motu*. Para proponerla, necesitaba nuevos conceptos de *masa* y *fuerza* que no sólo se aplicaran a las leyes del movimiento, sino también a las de la atracción. La teoría de la gravedad fue, pues, resultado de veinte años de maduración reflexiva en torno al movimiento orbital. Dos ediciones más conocerían los *Principia* en vida de Newton. Y dos versiones, una en inglés y otra en latín, su magna obra sobre teoría de la luz, la *Opticks*.

La lectura de los *Principia* irritó profundamente a Robert Hooke (1635-1703), que vio en sus páginas algo que él consideraba suyo: "Esas propiedades de la gravitación que yo descubrí primero y mostré ante esta Sociedad" (*London's Leonardo. The Life and Work of*

Robert Hooke). A finales de 1679, el entonces secretario de la Regia Sociedad londinense escribió a Newton planteándole varios temas de investigación, con el fin de atraerle hacia una mayor participación en las sesiones. En el intercambio epistolar, Hooke le exponía su "hipótesis" de la descomposición del movimiento curvilíneo en un movimiento tangencial lineal y un movimiento acelerado dirigido hacia el centro de fuerzas. Le planteaba también la trayectoria descrita por un cuerpo bajo una fuerza del cuadrado inverso dirigida hacia un punto central en el espacio. Durante el transcurso de esta breve correspondencia, Newton descubrió la relación entre fuerzas centrípetas del cuadrado inverso y el movimiento kepleriano, que detalla en el inicio de los *Principia*. Pero no se lo comunicó a nadie. Tampoco se infería la gravitación universal, pues en 1681 llegaba a la conclusión de que los cometas no sufrían la influencia del Sol.

Aunque no desconocido, el calibre intelectual de Hooke comienza a emerger del caparazón de practicón con que hasta ahora se le ha venido celando. Huérfano en su niñez, se pensó en ponerle de aprendiz con un relojero, habida cuenta de sus extraordinarias habilidades manuales. Pero su finura artística le condujo al taller del retratista londinense Peter Lely, para cuyos cuadros pintaba fondos y otros adornos. Construía sus propios juguetes mecánicos, entre ellos un barquito armado que andaba sobre un remanso de agua dulce y disparaba su santabárbara. Tras examinar los componentes de un reloj de latón creó un modelo funcional de madera. Sus manos seguían su capacidad de observación. Por su delicada salud, que no resistía el olor de las pinturas, se vio obligado a dejar el taller, para matricularse en el Colegio de Westminster, donde aprendió latín, griego y algo de hebreo. De Westminster pasó al Christ Church de Oxford. Se graduó en 1663. En su tiempo libre acudía a las tiendas de los artesanos para dominar nuevas técnicas. Conocedor de sus extraordinarias habilidades mecánicas, John Wilkins le regaló un ejemplar de *Mathematical Magic*. Wilkins recibiría el mayor encomio en la *Micrographia*, que redactara Hooke andando el tiempo.

Otro oxoniense que ejerció una temprana influencia en Hooke fue Seth Ward, profesor de astronomía. A sugerencia del mismo, ideó la forma de mejorar el movimiento del péndulo para medir las observaciones astronómicas. Con una reputación acreditada en experimentación, fue contratado por Thomas Willis para trabajar en su laboratorio químico en la preparación de medicamentos. De aquí pasó al de Robert Boyle. Interesado éste en las propiedades físicas del aire, supo de los trabajos realizados en Magdeburg por Otto von Guericke, quien se valía de una bomba para demostrar que el aire tenía peso: si operaba el vacío en una vasija, el recipiente pesaba menos que antes. El germano demostró también la existencia de la presión atmosférica y el enorme trabajo necesario para superarla (su famoso experimento de la separación de los hemisferios unidos en los que se había hecho el vacío). Boyle se propuso repetir los ensayos de von Guericke. Hooke le construyó la bomba de vacío, con tan buen resultado que, juntos, realizarían hasta 43 experimentos, publicados en la primera obra científica de Boyle, sus *New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effects* (1660). En 1661, llegaron, a través de ulteriores ensayos, a las relaciones entre presión y volumen del aire, la denominada ahora "ley de Boyle": el volumen de un gas a temperatura constante es inversamente proporcional a la presión.



1. Ilustración, realizada por el propio Hooke, de una superficie de fractura de piedra de Kettering (Ketton stone)*. Figura 1 del esquema IX de la* Micrographia *(1665)*

Necesitada la Regia Sociedad de alguien capacitado para llevar a cabo las demostraciones que constituían el núcleo de las sesiones académicas, la elección de Hooke, nimbado de fama, no admitía dudas. El trabajo de "curator" entrañaba no sólo realizar tres o cuatro experimentos propios los días de reunión, sino también los ideados por los miembros de la Sociedad, lo que conllevaba una notable capacidad de comprensión teórica del mecanismo subyacente. Construyó telescopios y cuadrantes para la observación de cuerpos celestes y microscopios para los objetos mínimos. Hooke se proponía reforzar la capacidad de percepción en todo el proceso de la misma. Insistía así en los procedimientos mecánicos, más adecuados de suyo para la medición que para la observación propiamente dicha, accesorios que permitieran, por ejemplo, una lectura mecánica: micrometros, barómetros de rueda o

magnetómetros. Fabricó un ojo artificial. Los resultados de su observación microscópica llaman todavía la atención por la minuciosidad de los dibujos.

Se propuso potenciar todos los sentidos de la percepción sensible. Tras abordar la visión, en el prefacio de la *Micrographia*, pasa revista a los cuatro sentidos restantes. Con trompetillas refinadas se refuerza la acuidad acústica. Al ocuparse del sentido del olfato repara en las capacidades de otros organismos para detectar propiedades específicas, como el tiempo o el carácter tóxico. Por lo demás, ¿qué es el olor sino la detección de los efluvios? Y esos cambios en el aire se reflejan en las variaciones experimentadas por una columna de mercurio. Se afinará esa percepción con un mejor barómetro. O, según el caso, con un higroscopio. Sus trabajos químicos pueden relacionarse con el sentido del gusto. Si el tacto juzga los movimientos más violentos de las partículas de los cuerpos, el aparato que detecte la disposición mecánica mínima de la materia, como el microscopio, mejora dicho sentido. No menos espectaculares fueron sus creaciones en horología mecánica. Ideó resortes equilibradores antes de que se difundiera el diseño de Huygens. Y salió al paso de los problemas de longitud en mar abierto con su "instrumento para tomar ángulos en una dirección", que constaba de un espejo montado sobre un brazo y un visor telescópico en el otro.



2. Resolución, elaborada por Hooke y Oliver, de una de las disputas generadas entre vecinos durante la reconstrucción de Londres

Si la *Micrographia* fue tanto obra de la Regia Sociedad como del propio Hooke, su teoría de la ciencia se expone en *General Scheme*. Para elaborar una filosofía natural rigurosa, parte, al estilo baconiano, de una "historia natural" exhaustiva. Compete al científico reunir datos fiables y suficientes, tabularlos de una manera sistemática, y luego avanzar cautas generalizaciones. Habla de un álgebra filosófica o arte de dirigir la mente en la búsqueda de las verdades filosóficas. (A la muerte de Henry Oldenburg, sucedida en 1677, pasó a formar parte de la Regia Sociedad y fue nombrado uno de sus dos secretarios. Desde 1665, era también profesor de geometría en el Gresham College. En cuanto tal se requirió su colaboración para supervisar la reconstrucción de Londres, tras el fuego arrasador de 1666.)

Newton, que se mostró siempre convencido de que, en asuntos de filosofía natural, el yunque empírico debe ser siempre el árbitro último, aprendió de Hooke cómo encarnar una idea en un proceso mecánico. Cómo convertirla en una reacción química se lo debía a George Starkey (*Alchemy Tried in the Fire. Starkey, Boyle, and the Fate of Helmontian Chymistry*). Entre los apuntes químicos newtonianos abundan los extractos tomados de *Pyrotechny* y otros escritos de Starkey. A su alias Eirenaeus Philalethes hay que atribuirle el empeño que puso Newton por descifrar los procesos velados del *magnum opus* de la alquimia. En su imponente colación de escritores alquímicos, el *Index Chemicus*, contiene unas 300 referencias a Philalethes.

Mientras preparan la edición crítica de los cuadernos de laboratorio del químico norteamericano recalado en Londres, Newman y Principe nos sumergen en un capítulo decisivo de la historia de la alquimia y de la química, en concreto, el del supuesto sacrificio de la primera, representada por Starkey, y la emergencia de la segunda, de la mano de Boyle. Es tesis de los autores, aquí demostrada, que muchos de los principios y prácticas de la química moderna se hallaban ya presentes en la alquimia. En ese contexto, recibe nueva luz la figura central de Joan Baptista Van Helmont, fuente en la que bebe Starkey y merecedor del aprecio de Lavoisier.

Hijo de un preste escocés, Starkey se matriculó en Harvard en 1643, a los 15 años. Recién egresado, crea su propio laboratorio y se sumerge en la obra de van Helmont, es decir, en la transformación de los metales y otros *arcana maiora* que piensa desentrañar con la interpretación de los textos de Jean d'Espagnet y el *Theatrum chymicum*. Ante la limitación de medios en la colonia, emigra a Inglaterra. Llega a Londres en 1650 y traba contacto con el círculo de Hartlib —grupo de reformadores, utópicos y filósofos congregados en torno a la figura de Samuel Hartlib— con el que Boyle se hallaba relacionado desde el decenio precedente. Desde 1651, año en que se conocieron, Starkey y Boyle comenzaron a colaborar en preparaciones y experimentos químicos, de lo que da testimonio Boyle en su *Usefulnesse of Experimental Naturall Philosophy* y ra-

3. Resorte en espiral y resorte helicoidal. Dos “escalas filosóficas” publicadas por Hooke en De Potentia Restitutiva *(1678)*

tifica Starkey en su *George Starkey’s Pill Vindicated*. Para ser exactos, se trató de una iniciación de un Boyle neófito, guiado por un experto químico, consagrado a la consecución del mercurio filosófico (para obtener la piedra filosofal), el alkagesto y otros secretos, sin olvidar los remedios químicos. Sorprendidos por su rigor minucioso y claridad la receta donde Starkey describía la preparación del mercurio filosófico, la famosa *Clavis*, se ha venido atribuyendo erróneamente a Newton.

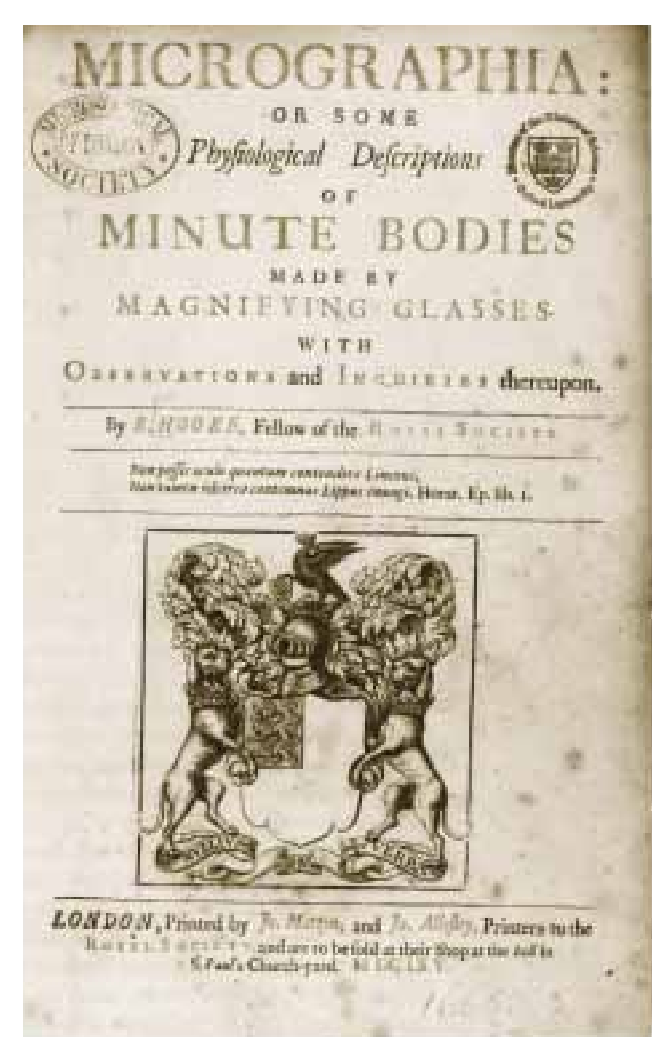
En torno al alkagesto, suerte de disolvente universal, giraba buena parte de la química helmontiana. De noble familia flamenca, Joan Baptista van Helmont se graduó en medicina por la Universidad de Lovaina en 1599. Se opuso al aristotelismo y galenismo de la academia desde su *Eisagoge in artem medicam a Paracelso restitutam*, de 1607, hasta su póstumo *Ortus medicinae*, de 1648. Rechazó, pues, la medicina escolástica, que él consideraba meramente deductiva, a la manera de los geómetras. Es decir, partían de un listado de axiomas para extraer conclusiones sin fundamento en la realidad, a la que no conocían ni medían. Pese a proponer que la salud se basa en el equilibrio (*symmetria*) de los cuatro humores, la medicina universitaria no puede ni siquiera demostrar que existan las dos bilis en el organismo, objeta. Antes bien, los galenistas *provocan* la producción de bilis dentro del cuerpo mediante la administración de escamonea y otras purgas ponzoñosas que pudren y licúan las estructuras internas. Sus tablas de sangría, gobernadas por las fases de la luna, y sus cálculos del “período climatérico”, son préstamos incorrectos de los números pitagóricos.

Para van Helmont, los principios que gobiernan los seres, animados e inanimados, son los *semina* y el *archaeus*. Distingue entre el cambio superficial físico y las interacciones químicas internas; éstas resultan en una transformación de la identidad substancial. Tal distinción se plasma en el agua; si se trata de un cambio de estado (de hielo a líquido, por ejemplo), nos hallamos ante un proceso físico; si de la transformación del agua en otras sustancias, de un proceso químico. El agua constituye para van Helmont el elemento primordial, que consta de corpúsculos constituidos por los *tria prima*: mercurio, azufre y sal. Entiéndanse éstos no como “principios de composición” preexistentes, sino como “principios de heterogeneidad”. Al enfoque esencialista, cualitativo, de la materia contrapone una metodología cuantitativa. La materia, postula, se conserva siempre; nada llega a ser a partir de la nada. La masa que entra en una reacción es la masa que aparece al final de la misma, con independencia de las transformaciones que hayan ocurrido. En numerosas ocasiones determinó el peso específico, tomando el estaño como medida unitaria. No podía ser éste el tema menos caro a Newton.

La obra newtoniana no sólo incide en los tratados académicos (*Die Werke von Daniel Bernoulli*). Merced a las excepcionales dotes pedagógicas de ciertos autores alcanza los salones (*Leonhard Euler. Lettres à une Princesse d’Allemagne sur Divers Sujets de Physique et de Philosophie*). Euler, por supuesto, ahondó también en los aspectos técnicos. A él debemos la demostración de que el planteamiento de Newton sobre el espacio y el tiempo se halla inextricablemente unido a sus leyes de movimiento, en particular a la ley de inercia.

Las *Cartas a una princesa de Alemania* aparecieron en tres volúmenes entre 1768 y 1772. Ese manojo de 234 epístolas conoció tal éxito popular, que se prodigaron reediciones y traducciones por Europa entera. Uno de los físicos y matemáticos más brillantes de todos los tiempos —“Leed a Euler, leed a Euler, es el maestro de todos”, repetía Laplace— resume en ellas la ciencia de su tiempo en un lenguaje terso, en imágenes vivas, sin aparato matemático alguno. Sin merma de precisión.

Euler nació en Basilea en 1707, hijo de un pastor protestante de condición modesta, aunque de sólida formación en matemática, amigo de Jacques Bernoulli



MICROGRAPHIA:
OR SOME
Physiological Descriptions
OF
MINUTE BODIES
MADE BY
MAGNIFYING GLASSES
WITH
OBSERVATIONS and INQUIRIES thereupon.

By R. HOOKE, Fellow of the ROYAL SOCIETY.

[illegible] Horat. Ep. lib. 1.

LONDON, Printed by [illegible] and [illegible], Printers to the ROYAL SOCIETY, and are to be sold at their Shop at the [illegible] in S. Paul's Church-yard. [illegible]

4. Frontispicio de la Micrographia *de Hooke (1665)*

(1655-1705). En la universidad de su ciudad asistió a las clases de Jean Bernoulli (1667-1748), hermano de Jacques y padre de Daniel Bernoulli (1700-1782), con quien mantendría perdurable relación. Gracias a éste, Euler recibió una invitación en 1727 para enseñar en la Academia de Ciencias de San Petersburgo. Catorce años más tarde, se trasladó a la Academia de Ciencias de Berlín. Allí redactó las *Lettres*. Un cuarto de siglo más tarde, y con la subida al trono de Catalina la Grande, volvió a San Petersburgo, donde las publicó.

Escrito en francés, el idioma de la sociedad culta, el epistolario iba destinado a la princesa Sophie Friederika Charlotte Leopoldine von Brandenburg-Schwedt, una adolescente que tenía entonces entre 15 y 17 años. No puede, pues, exigirle especiales conocimientos, si bien la comprensión de cada misiva, que procede de lo sencillo a lo más complejo, le demanda cierta atención. Tras una introducción en las nociones elementales sobre distancias y velocidades, Euler le expone con una claridad cristalina la propagación del sonido y su relación con la música. (Euler había escrito ya un tratado sobre teoría de la música. En realidad la mayoría de los aspectos abordados en las cartas encuentran su refrendo profundo en otros textos suyos.) De la acústica pasa a la óptica. Presenta la propagación de la luz mediante una teoría ondulatoria. Las cartas 45-79 están dedicadas a la gravitación universal de Newton y a sus consecuencias. La 52, que lleva por título "Sobre el descubrimiento de la gravitación universal realizado por el gran Newton", empieza: "La pesantez o gravedad constituye, pues, una propiedad de todos los cuerpos terrestres y de la propia Luna. Es la pesantez, en virtud de la cual la Luna es empujada hacia la Tierra, la que modera su movimiento, de la misma forma que la pesantez modera el movimiento de una bala de cañón o de una piedra arrojada por la mano. Debemos ese importante descubrimiento a Mr. Newton". Tras dar por cierta la leyenda de la manzana, le conduce hacia la importancia del hallazgo para el avance de la ciencia: "Este mismo Filósofo, por la fuerza de su espíritu, encontró el medio de determinar el movimiento de los cuerpos, una vez que se conoce la fuerza con que son impulsados; pues, habida cuenta de que había descubierto las fuerzas con que son impulsados todos los planetas, se halló capacitado para dar una descripción del movimiento de los mismos. En efecto, antes de este gran Filósofo, la ciencia se encontraba en una profunda ignorancia del movimiento de los cuerpos celestes; gracias a él contamos con las grandes luces de que disfrutamos ahora en Astronomía".

De Newton depende Daniel Bernoulli en la creación de la nueva ciencia de los fluidos, expuesta en su *Hydrodynamica*, cuya primera versión redactó en los años iniciales del decenio de 1730, durante su estancia en San Petersburgo. Ese manuscrito, sin embargo, diverge en forma sustancial del que se imprimió finalmente en 1738. Se sirvió, en particular, de la idea newtoniana de fuerza para aplicarla a los fluidos. Uno de sus resultados que han llegado a los manuales escolares es el llamado principio de Bernoulli, sobre el flujo de un líquido a través de una tubería de diámetro variable: contra lo que intuitivamente pudiera esperarse, la presión en la sección inferior es menor que la presión en la sección más ancha. En otro experimento ideal suyo se basa la teoría cinética de los gases.

El contenido y justificación del libro lo explicita Bernoulli en carta a Johann Daniel Schoepflin: "La fuerza y el movimiento de los fluidos; por decirlo en una sola palabra, lo llamaré *Hydrodinamica*". Consta de trece secciones. Tras una introducción histórica, donde reconoce la deuda contraída con Newton, "virum meritis suis immortalem" (sección I) y unos prenotandos de hidrostática (sección II) aborda *in extenso* (de la sección III a la VIII) la teoría matemática de un movimiento cuasiunidimensional no uniforme de un fluido compresible en los tubos y su flujo a través de aberturas, tomando en consideración la pérdida posible de "fuerzas vivas" (energía cinética). En la sección siguiente, acerca de las máquinas hidráulicas, introduce dos nociones fundamentales, la de *trabajo* (*potentia absoluta*) y la de *rendimiento*. Luego, avanza sobre las propiedades y movimientos de los fluidos elásticos, vórtices cartesianos, estática de los fluidos en movimiento, "que yo llamo hidráulico-estática", y dinámica de sistemas con masa variable.

—LUIS ALONSO

SIDA EN HISPANOAMERICA

CULPA Y CORAJE. HISTORIA DE LAS POLÍTICAS SOBRE EL VIH/SIDA EN EL PERÚ, por Marcos Cueto. Consorcio de Investigación Económica y Social/Facultad de Salud Pública y Administración, Universidad Peruana Cayetano Heredia; Lima, 2001.

La presente monografía aborda la historia de la respuesta pública al sida en el Perú. Su autor es conocido por su notable obra sobre la historia social de la ciencia y de la salud en América Latina (acaba de coeditar, junto a Gilberto Hochman, Ana María Carrillo y Ana Cecilia de Romo, el suplemento titulado "Ciencia, Salud y Poder en América Latina y en el Caribe" en la revista brasileña *História, Ciências, Saúde. Manguinhos*, 2002, vol. 9) y es pertinente recordar ahora *El regreso de las epidemias. Salud y sociedad en el Perú del siglo XX* (Lima, 2000), donde había revisado desde los episodios de peste de 1903 al cólera de 1991, y del que el texto que comentamos es una continuación lógica. El sida aparece como la última gran epidemia del siglo XX, abarcando las dos últimas décadas del mismo. Curiosamente, sin que se haya conseguido una terapéutica que garantice la curación, ni se haya producido una vacuna válida para prevenir este azote, en el mundo occidental se ha vivido un proceso de "normalización", por el cual la vivencia catastrófica frente al sida se ha sustituido por una consideración de enfermedad crónica, asumible por el sistema médico.

De este modo se ha reconducido un proceso en el que grupos legos activos habían cuestionado tanto la organización como la eficacia de la atención médica y habían forzado a prestar atención a nuevos modelos de intervención, con gran protagonismo de los propios afectados, como tuve recientemente ocasión de analizar en una reunión profesional ("Análisis histórico de la prevención y perspectivas actuales". En Inés García-Sánchez, Sandra Arlette Pinzón, Ana Rivadeneyra, eds., *Sida y mujer. Buenas prácticas en prevención*. Granada, Escuela Andaluza de Salud Pública, 2002, pp. 43-55). El cambio no es independiente de la marginalización efectiva de la epidemiología del sida, con una prevalencia disparada en amplias zonas periféricas del mundo, en particular en Africa, así como con la imagen profundamente arraigada en la conciencia occidental de que su incidencia afecta a sujetos socialmente marginales. No hay que olvidar el principal mandamiento de esta "sociedad del espectáculo", donde sólo lo nuevo vende y los titulares de los medios de comunicación se vuelcan periódicamente sobre una u otra de las infecciones emergentes: el caso actual, el de la neumonía asiática atípica, en términos poblacionales una amenaza ínfima en comparación con la lacra de la infección por VIH.

Cueto no llega a analizar este aspecto tan de actualidad, naturalmente. En su libro establece tres etapas en la situación peruana, cada una de ellas correspondiente a un determinado programa de intervención. Durante la primera etapa, 1983-87, la presencia del sida se vivió como un problema estrictamente médico, procedente del exterior y ligado a grupos marginales, de manera que la consideración oficial nunca alcanzó a definirlo como una situación de emergencia y no se registró ninguna actividad pública específica. Es curioso, no obstante, que los medios periodísticos compartieran la imagen de amenaza catastrófica con que se había recibido en otros países occidentales, en especial, pero no sólo, en Estados Unidos. En la etapa siguiente, entre 1988 y 1995, se inició el Proyecto Especial de Control de Sida, bajo los auspicios de las organizaciones sanitarias internacionales (OMS-OPS) y con fuerte implicación de voluntarios y varias ONG, que compiten en cierta forma con médicos y funcionarios. A partir de 1996 se inició el Programa de Control de Enfermedades de Transmisión Sexual y Sida, que ha incorporado varias de las novedades internacionales en el campo de la orientación preventiva, en particular las que se refieren a la inclusión de aspectos socioculturales.

El texto es de cómoda lectura y de fascinante interés, apoyado en un amplio caudal de fuentes, oficiales y privadas, en la búsqueda del esclarecimiento de las interconexiones entre personas, estructuras y procesos. Resulta también muy interesante percibir la interrelación entre propuestas e intereses nacionales y ofertas e intereses internacionales, una faceta más en el caleidoscopio de la construcción social de una enfermedad, pero cada vez más importante en el globalizado mundo en que vivimos.

—ESTEBAN RODRÍGUEZ OCAÑA

Dennis E. Shasha

Conmutador de líquidos

Imaginemos cinco tubos verticales, dispuestos en círculo (*véase la ilustración*). Los tubos están rotulados A, B, C, D y E; cada letra denota el color del agua que le llega desde arriba, a saber, amarilla, azul (*blue* en inglés), carmesí, diamante y esmeralda. (Dado que los tubos están dispuestos en círculo, el tubo A se encuentra entre los tubos B y E.). Cada par de tubos contiguos está comunicado por tres válvulas, o conmutadores, que permiten el intercambio de los líquidos. Por ejemplo, al abrir la válvula superior que comunica los tubos A y B, el agua teñida de amarillo que baja por el tubo A se desvía al tubo B, mientras que el agua azul del tubo B pasa a fluir por el tubo A. Los fluidos se pueden intercambiar en puntos adicionales mediante válvulas situadas a media altura y en la parte baja. En cada nivel, el agua puede fluir hacia la derecha, hacia la izquierda, o bien continuar directamente hacia abajo si las dos válvulas están cerradas. Ahora bien, el agua no puede fluir a la vez en dos direcciones. Si, por ejemplo, estuviera abierta la válvula que conecta A con E, no podría hallarse abierta también la que conecta A con B.

He aquí un problema para empezar: ¿Sería posible, accionando las válvulas, que la distribución de los colores de los líquidos que entran en los tubos A, B, C, D y E pasara a ser C, D, E, A y B al salir por la parte inferior? (Es decir, que del tubo A saliera agua carmesí, del B color diamante, y así sucesivamente.) Como se indica en la ilustración, es preciso abrir en primer lugar las válvulas que comunican los tubos A y B por una parte, y los C y D, por otra, lo que trueca la secuencia de colores en B, A, D, C y E. Se abren después dos de las válvulas centrales para lograr la serie B, D, A, E y C. Por último, abriendo dos de las válvulas inferiores se logra la disposición deseada.

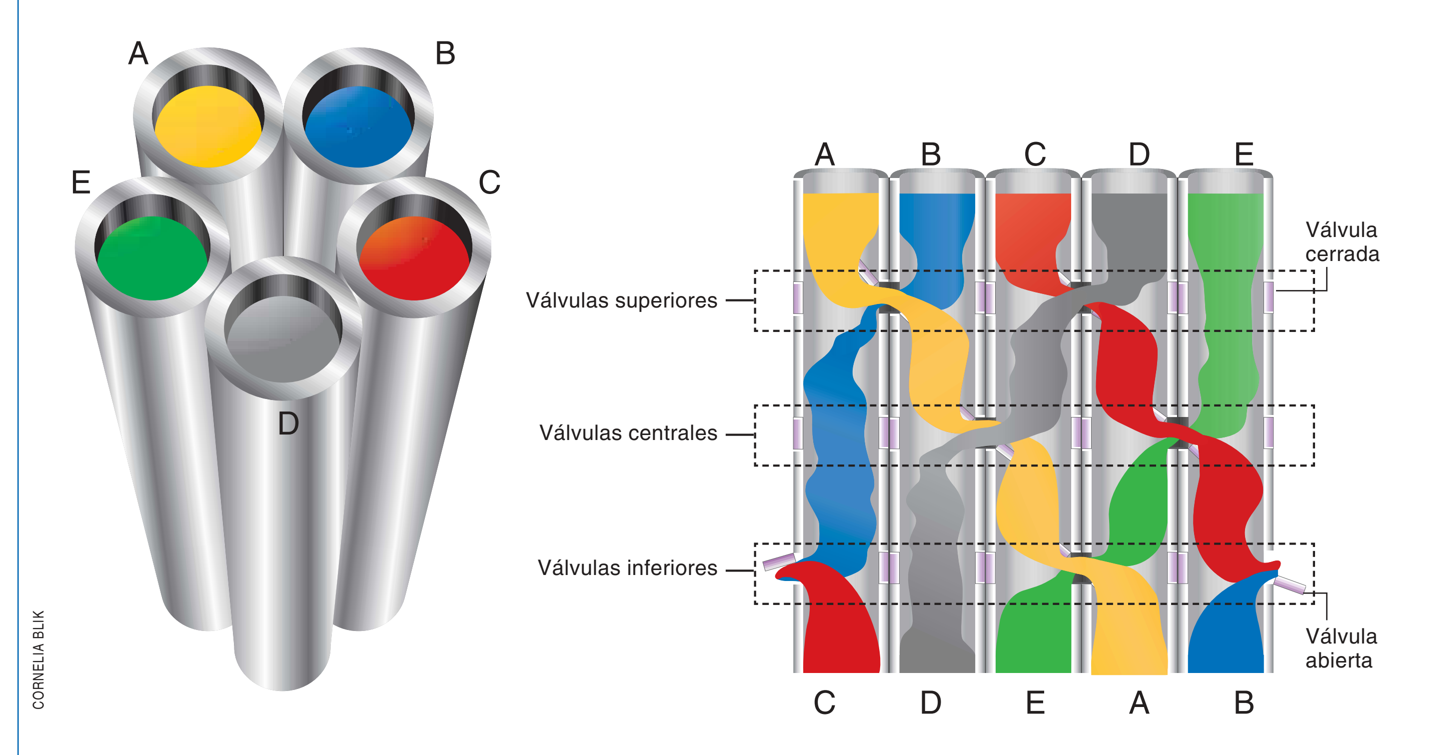
Esta permutación de colores difiere tanto de la original que cabría pensar que cualquier configuración es posible. ¿Es verdadera tal suposición? De no serlo, ¿cuáles son las permutaciones posibles? ¿Cuáles las imposibles? ¿Cuántos niveles adicionales de válvulas habría que introducir para poder lograr una disposición cualquiera?

Solución del problema del mes pasado:

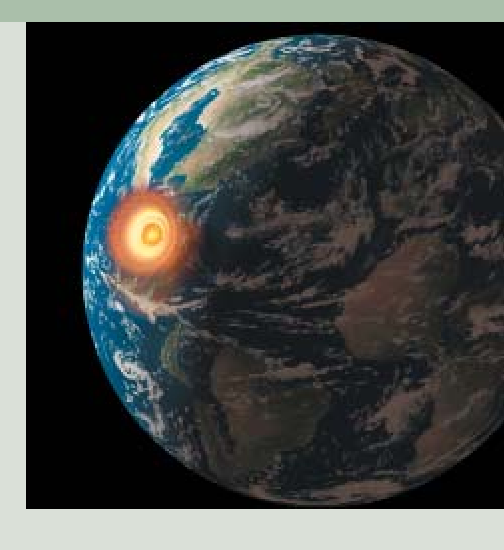
Si el valor máximo de la fuerza es 21, la colección máxima de valores distintos que define una configuración estable es 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 21. Con repetición de valores, el conjunto mayor consta de 21 valores iguales a 1, más el valor 22. La posesión de "aguijón" (indicada mediante un asterisco) no es necesariamente estabilizadora. Una configuración de 5, 4 y 3 resulta estable. Pero el sistema compuesto por 5, 4* y 3* resulta inestable, porque una coalición de 3* y 4* ataca a 5 sin consecuencias.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.







EL DIA QUE EL MUNDO ARDIO, por David A. Kring y Daniel D. Durda

El impacto que aniquiló a los dinosaurios desencadenó una oleada de incendios forestales que arrasó los bosques de la Tierra.

¿EXISTEN LAS RAZAS?, por Michael J. Bamshad y Steve E. Olson

Si las razas se definen como grupos genéticamente separados: no. Pero se pueden utilizar marcadores genéticos para agrupar individuos con fines médicos y terapéuticos.

ATGGGATAG
CGCGGAGC
CAGCGCGCT
CTAGACAG
ACGTAGCAT
ATCGGATAG
CGACGAGC
CAGTCCGC
GGGACAGT
ACAATAGCA-
TACGGATAG
CGATCCGCG

EL GENOMA INVISIBLE: MAS ALLA DEL ADN, por W. Wayt Gibbs

El ADN se consideraba hasta hace poco el único depósito de información genética. Ahora los biólogos empiezan a descifrar en el interior de los cromosomas una capa de información mucho más maleable. La epigenética se abre paso.

AGUJEROS NEGROS EN CONDENSADOS DE BOSE-EINSTEIN, por Carlos Barceló y Luis J. Garay

Los condensados de Bose-Einstein nos ofrecen la posibilidad de experimentar en laboratorios terrestres con “maquetas en miniatura” de objetos celestes tan esquivos como los agujeros negros.



ULUGH BEG, ASTRONOMO Y SOBERANO DE SAMARCANDA, por Bernhard Dumont

Ulugh Beg (1394-1449) fue uno de los astrónomos más famosos de Oriente en el siglo XV. Aunque un soberano terrenal, dedicó una gran parte de su tiempo al conocimiento del cielo. Para ello hizo construir en Samarcanda, actualmente territorio de Uzbekistán, un gran observatorio astronómico y realizó una competente investigación celeste. Este artículo presenta a Ulugh Beg y su obra.

LA PRUEBA DEL NUEVE, por Michel Ballieu

Todo el mundo, de los pitagóricos a los alumnos de enseñanza primaria, pasando por los matemáticos árabes y los algebristas del Renacimiento, han aplicado la prueba del nueve. ¿Es una receta mágica?

LA NUEVA LUNA, por Paul D. Spudis

Las recientes misiones a la Luna han revelado que todavía hay mucho por aprender del vecino más cercano a la Tierra.

BORRADO CUANTICO, por Stephen P. Walborn, Marcelo O. Terra Cunha, Sebastião Pádua y Carlos H. Monken

En mecánica cuántica cada historia tiene dos caras, pero sólo se puede ver una de ellas cada vez. Los experimentos muestran que al “borrar” una, aparece la otra.

